

Risultati recenti dell'esperimento Borexino: spettroscopia di neutrini solari dalla catena pp

IFAE 2018 - Milano

Davide Basilico

UniMi e INFN Milano



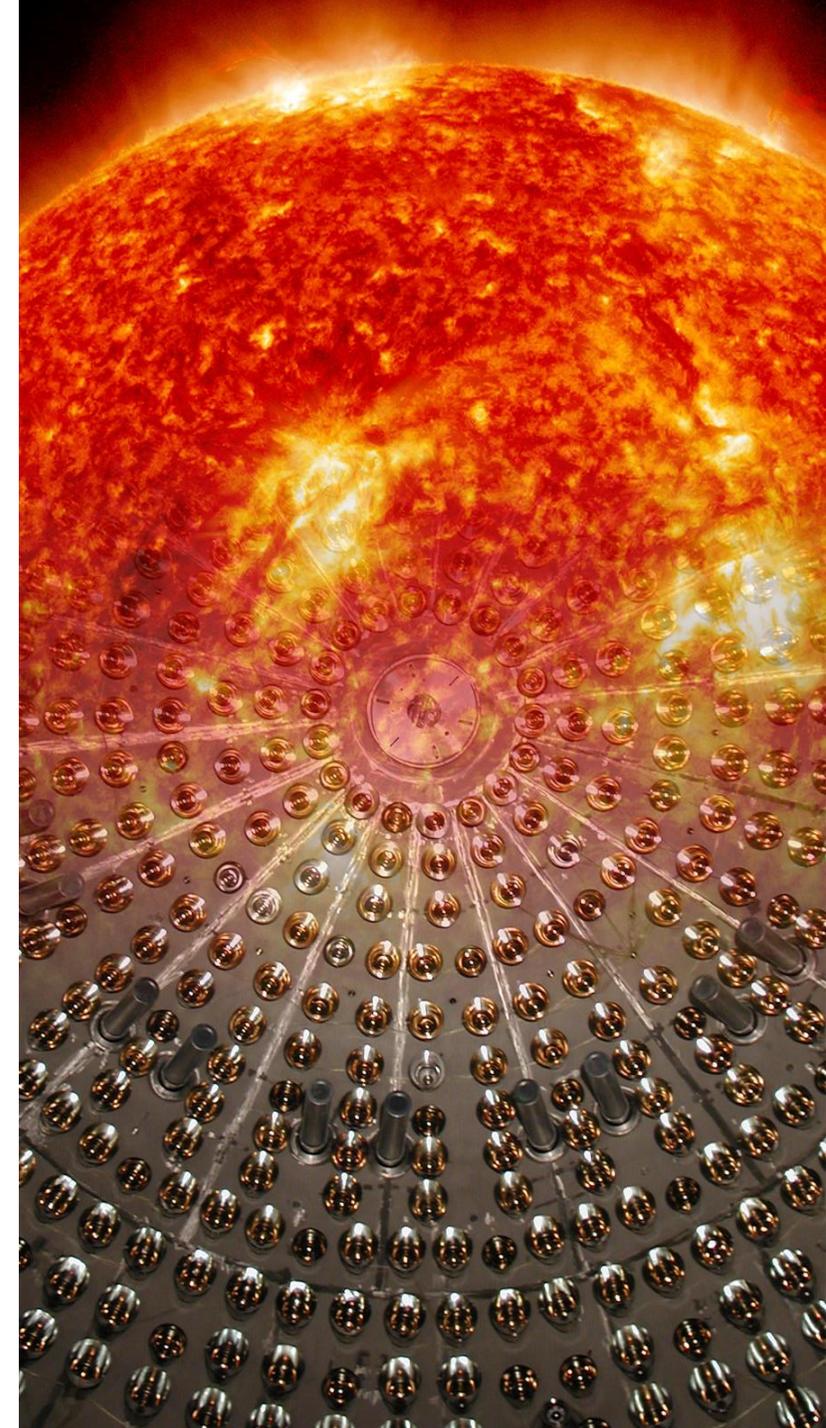
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI MILANO



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

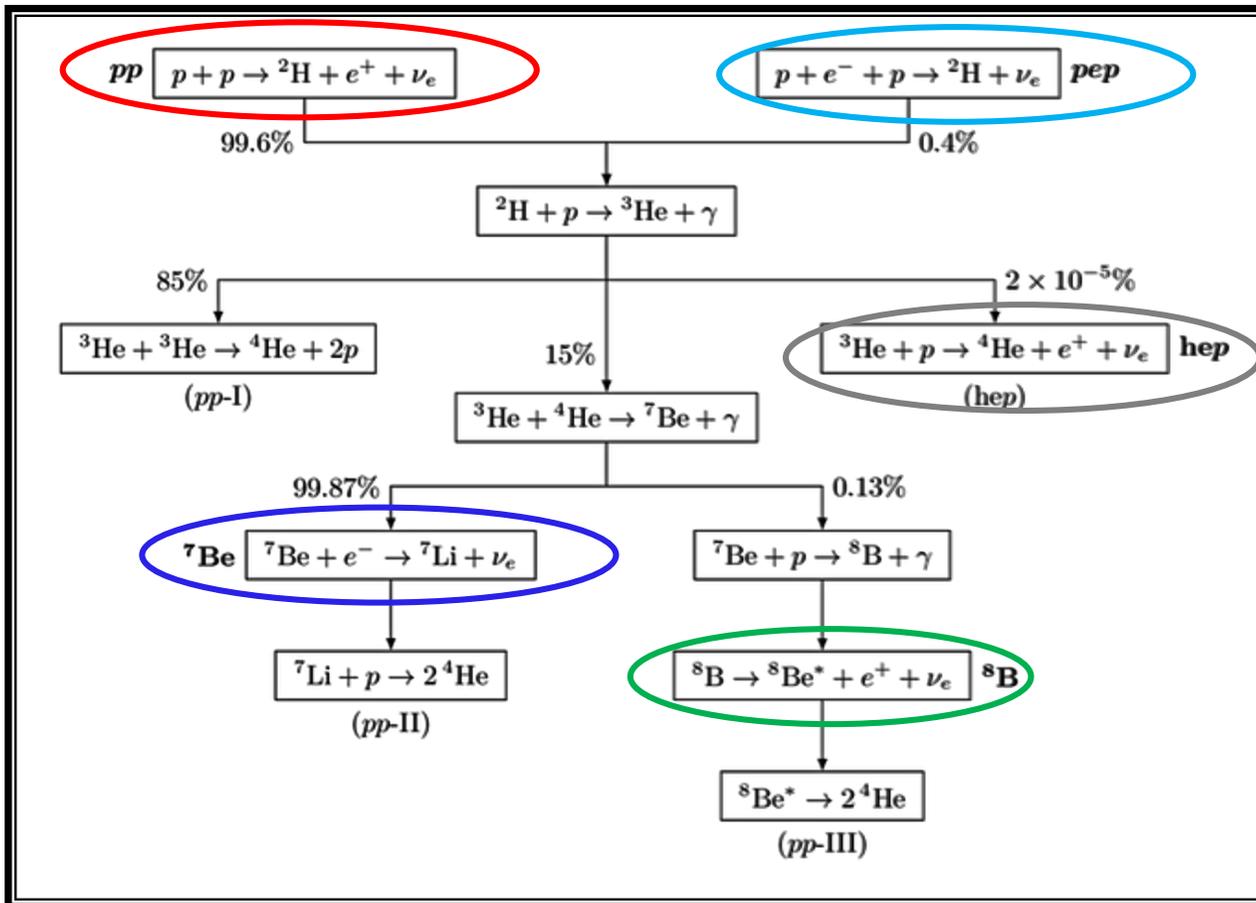
Schema della presentazione

1. I neutrini solari
2. Borexino
3. Risultati recenti e implicazioni



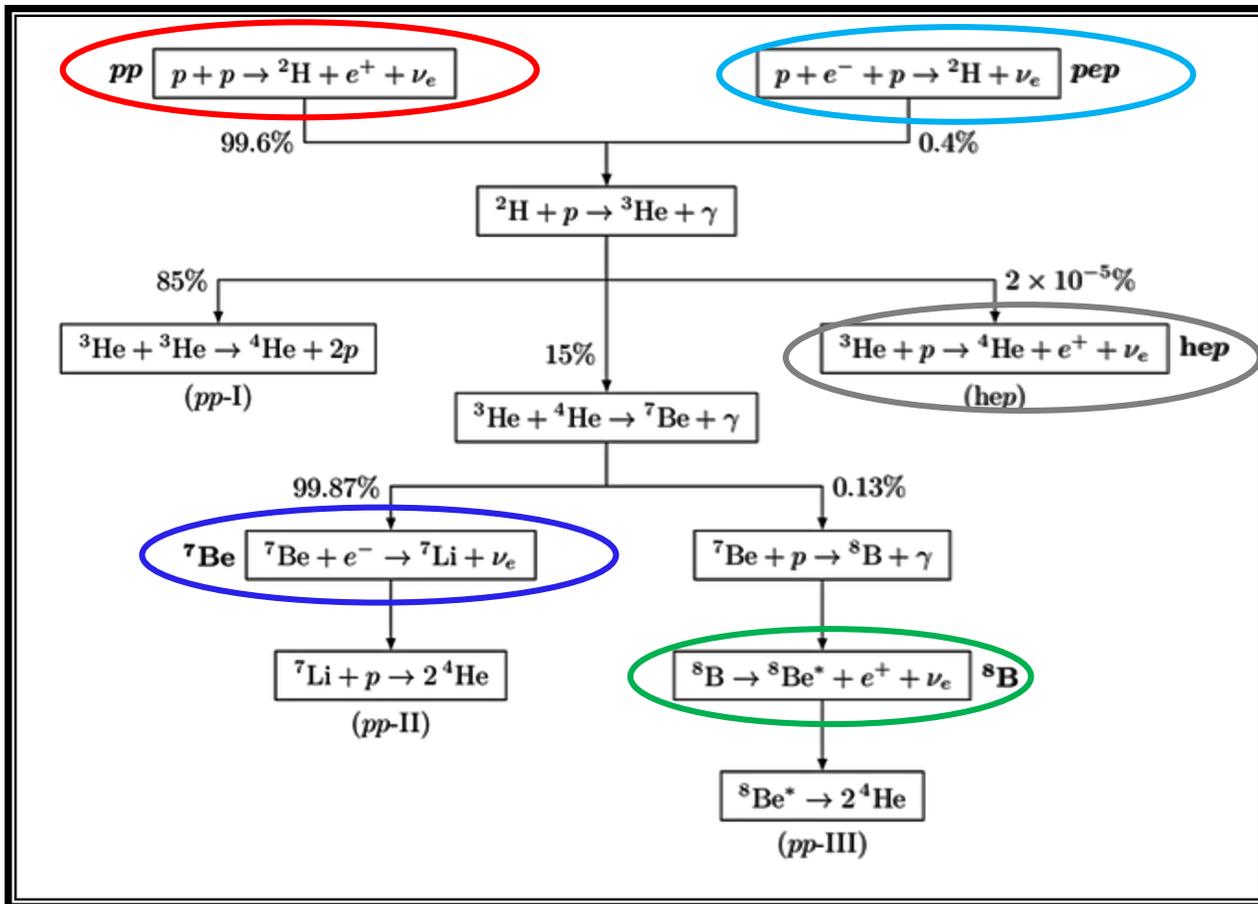
Neutrini solari

- Reazioni di fusione nucleare → emissione di neutrini
- “Fotografia” dell’interno del Sole
- Catena pp: dominante nel Sole (99%)

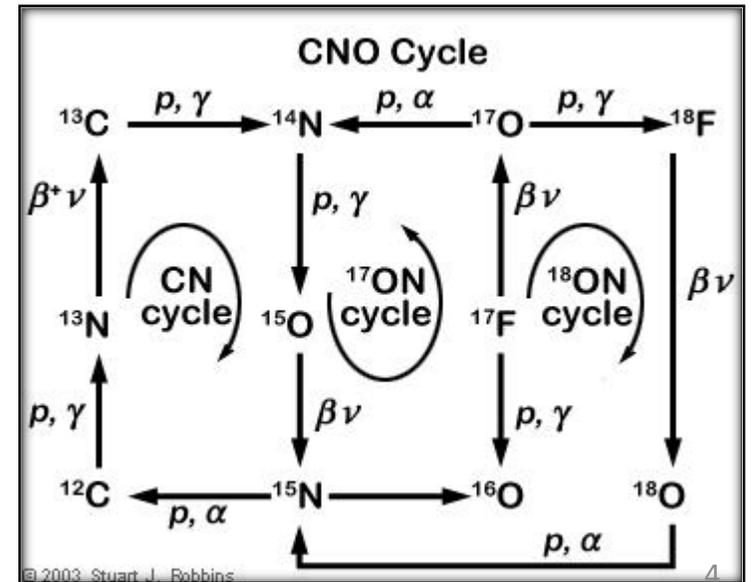


Neutrini solari

- Reazioni di fusione nucleare → emissione di neutrini
- “Fotografia” dell’interno del Sole
- Catena pp: dominante nel Sole (99%)

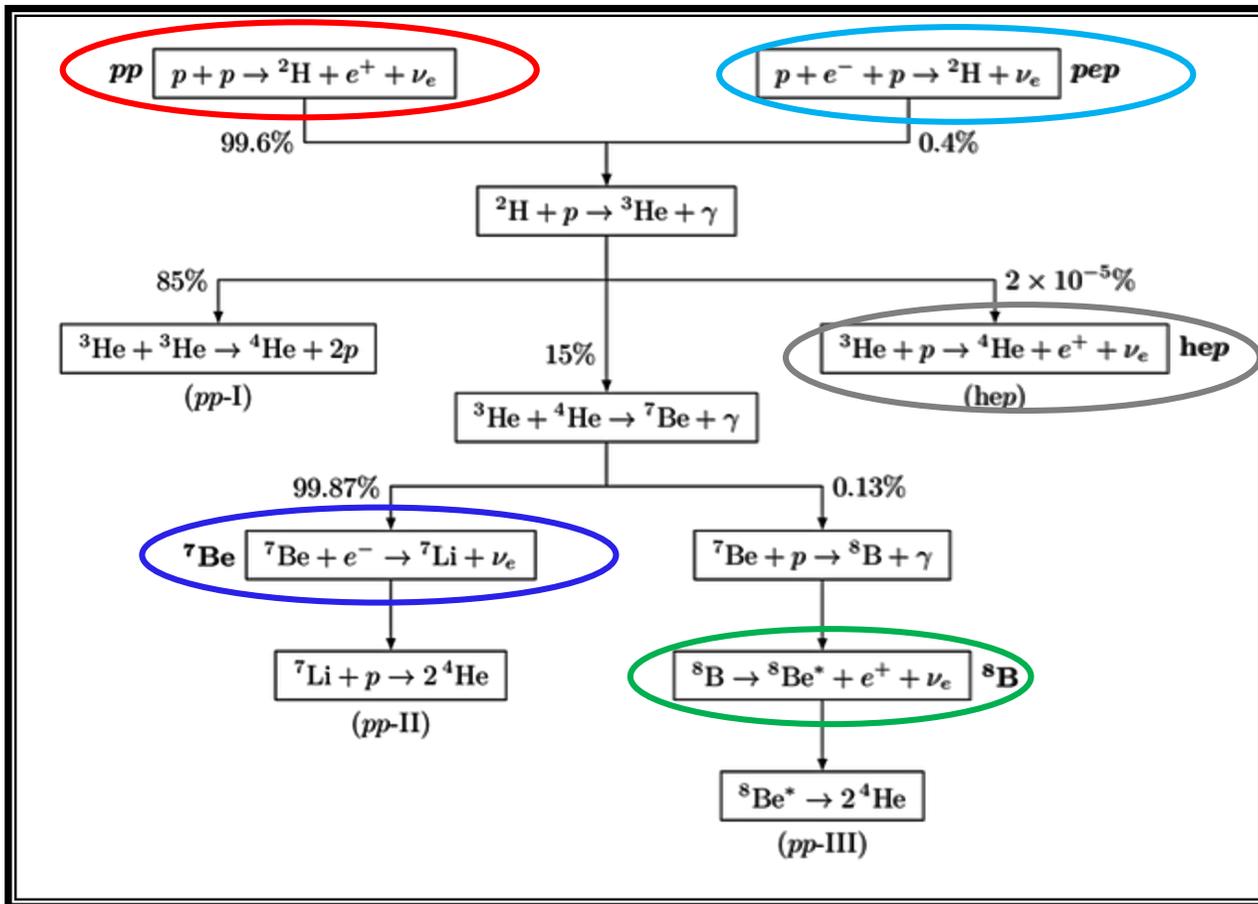
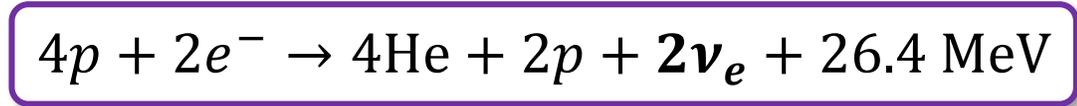


Ciclo CNO: nel Sole 1%,
dominante per stelle più
massive

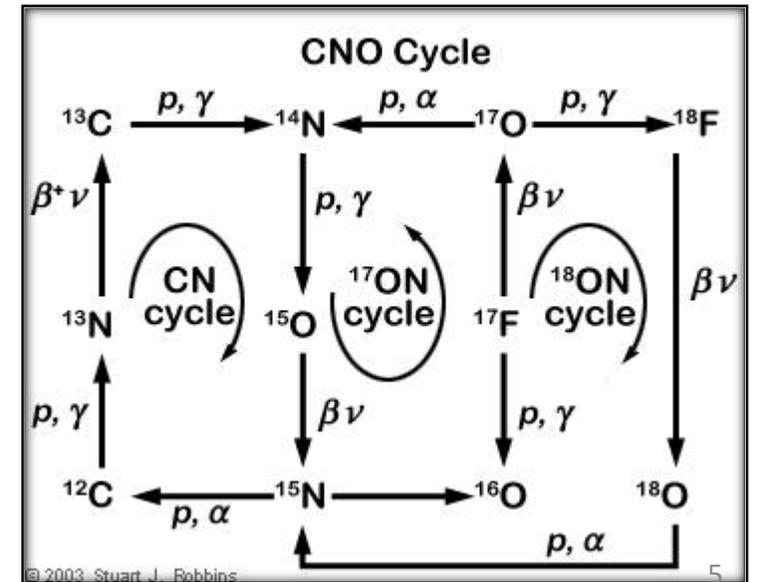


Neutrini solari

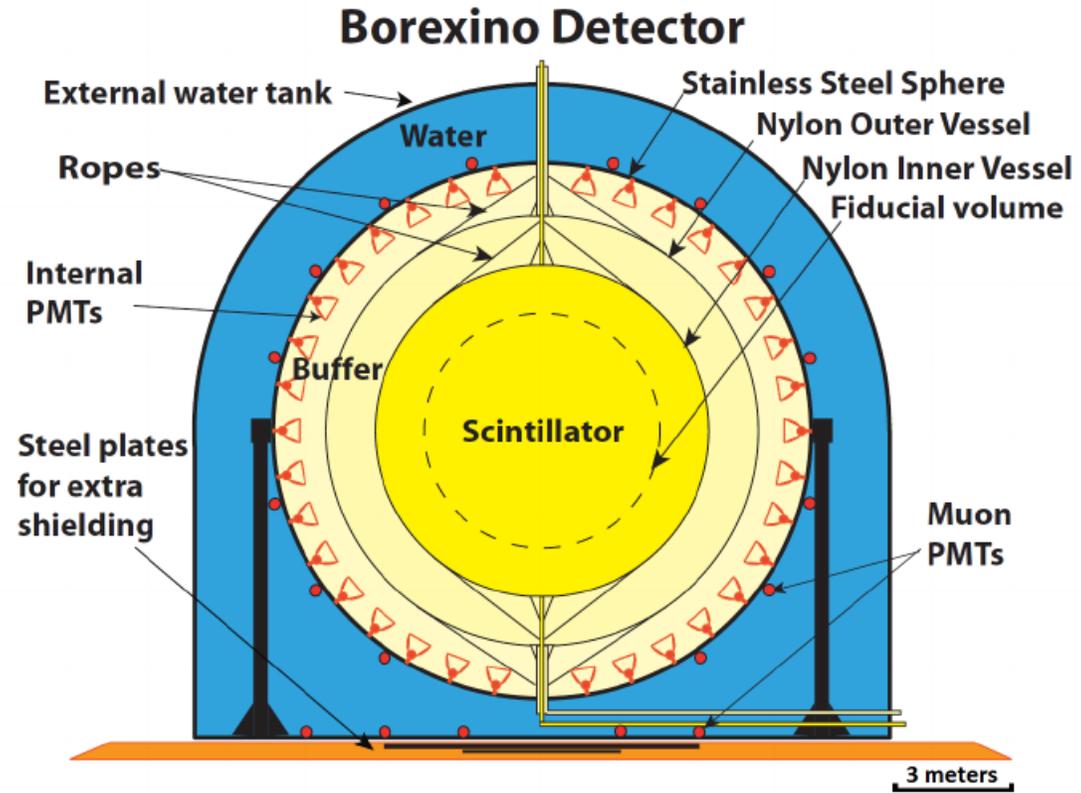
- Reazioni di fusione nucleare → emissione di neutrini
- “Fotografia” dell’interno del Sole
- Catena pp: dominante nel Sole (99%) →



↑
Ciclo CNO: nel Sole 1%,
dominante per stelle più
massive

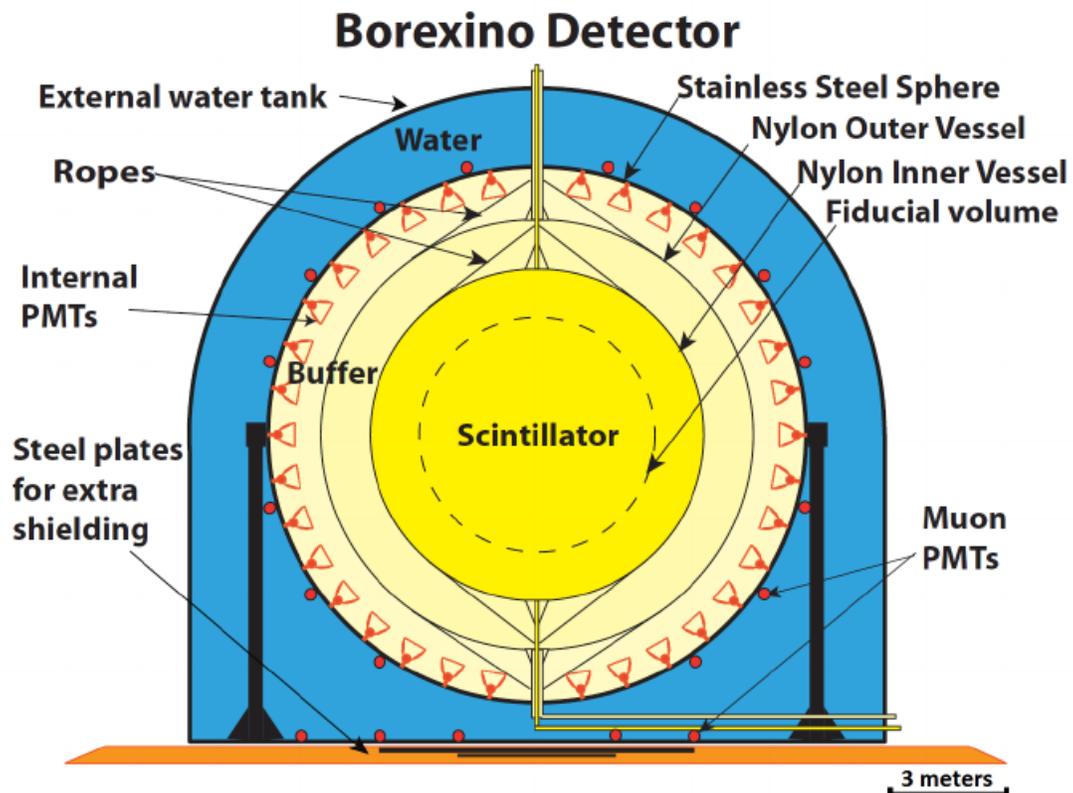


Borexino



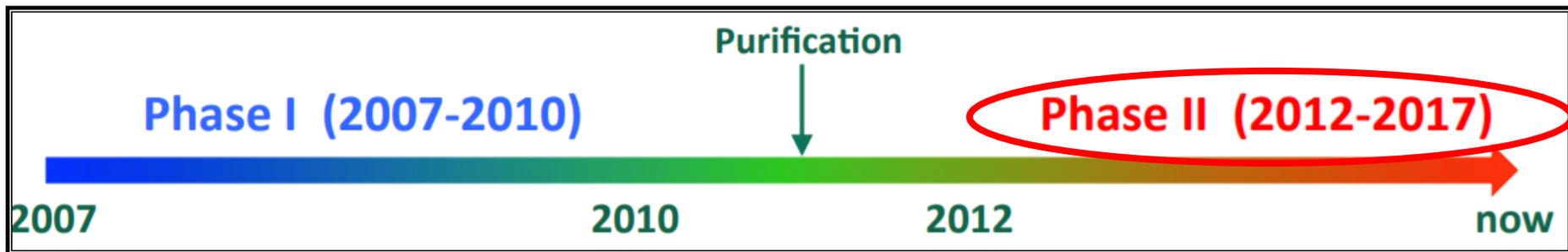
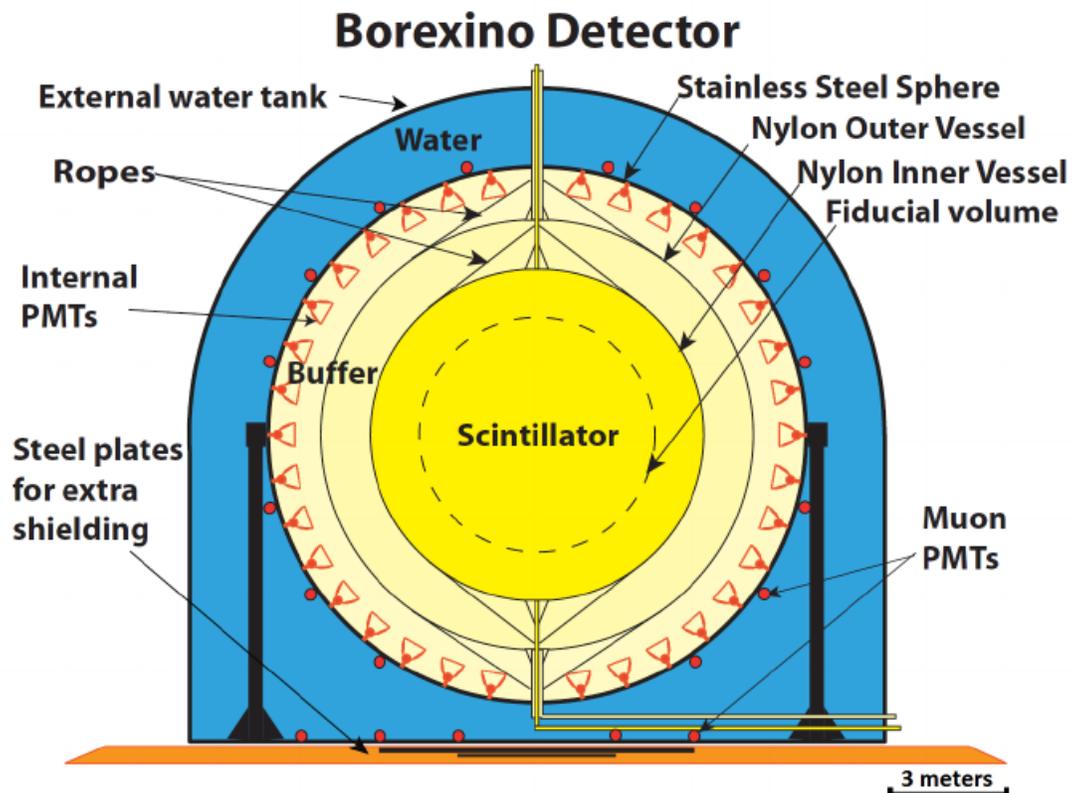
Borexino

- Dal 2007 @ LNGS
- Misura di ν solari di bassa energia: 300 ton di scintillatore liquido ultrapuro
- Bassissimo fondo radioattivo
- Rivelazione con scattering elastico:
$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad x = e, \mu, \tau$$
- 2000 fotomoltiplicatori:
 - Posizione \rightarrow tempi di arrivo fotoni
 - Energia \rightarrow numero fotoni

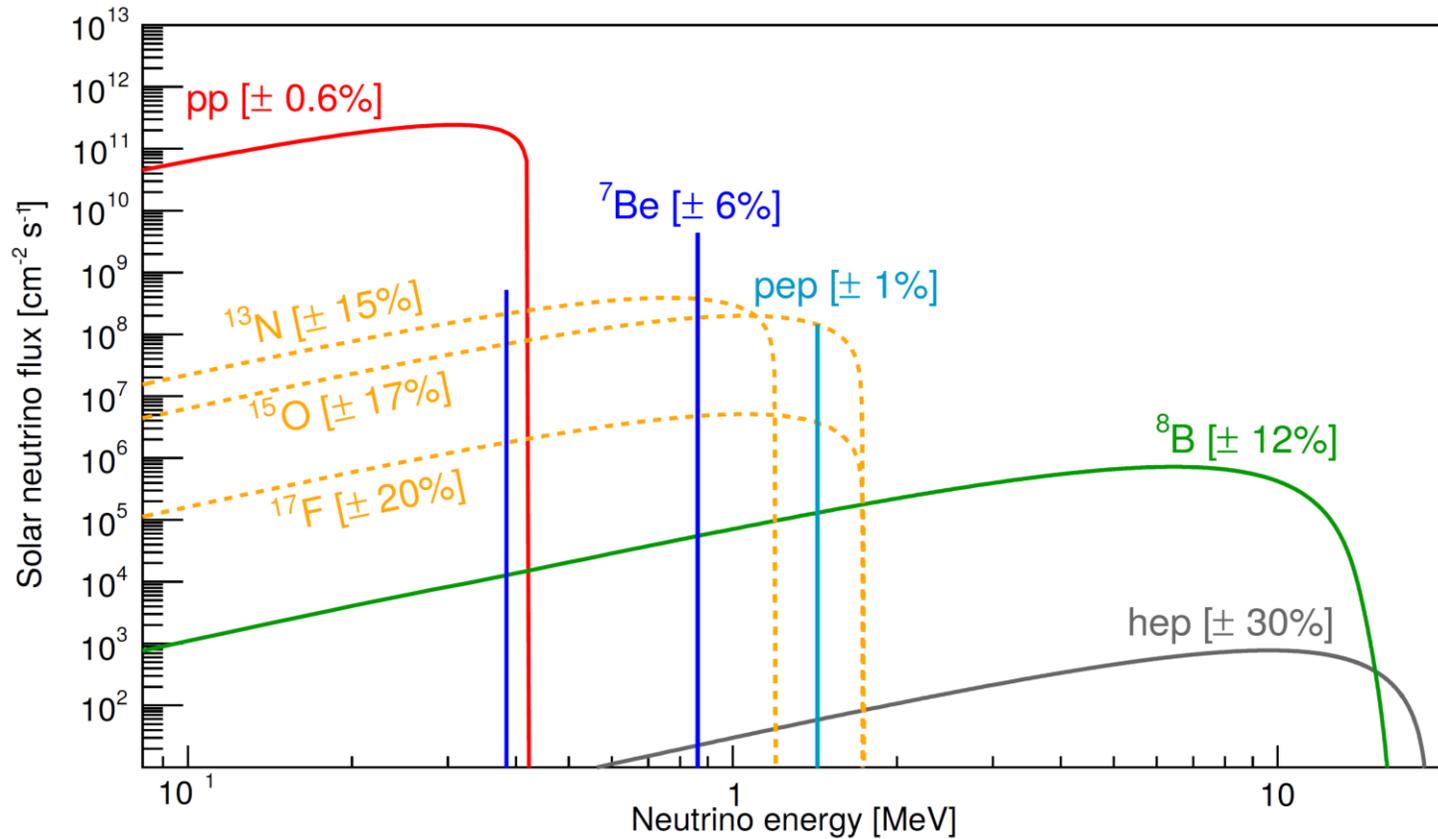


Borexino

- Dal 2007 @ LNGS
- Misura di ν solari di bassa energia: 300 ton di scintillatore liquido ultrapuro
- Bassissimo fondo radioattivo
- Rivelazione con scattering elastico:
$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad x = e, \mu, \tau$$
- 2000 fotomoltiplicatori:
 - Posizione \rightarrow tempi di arrivo fotoni
 - Energia \rightarrow numero fotoni

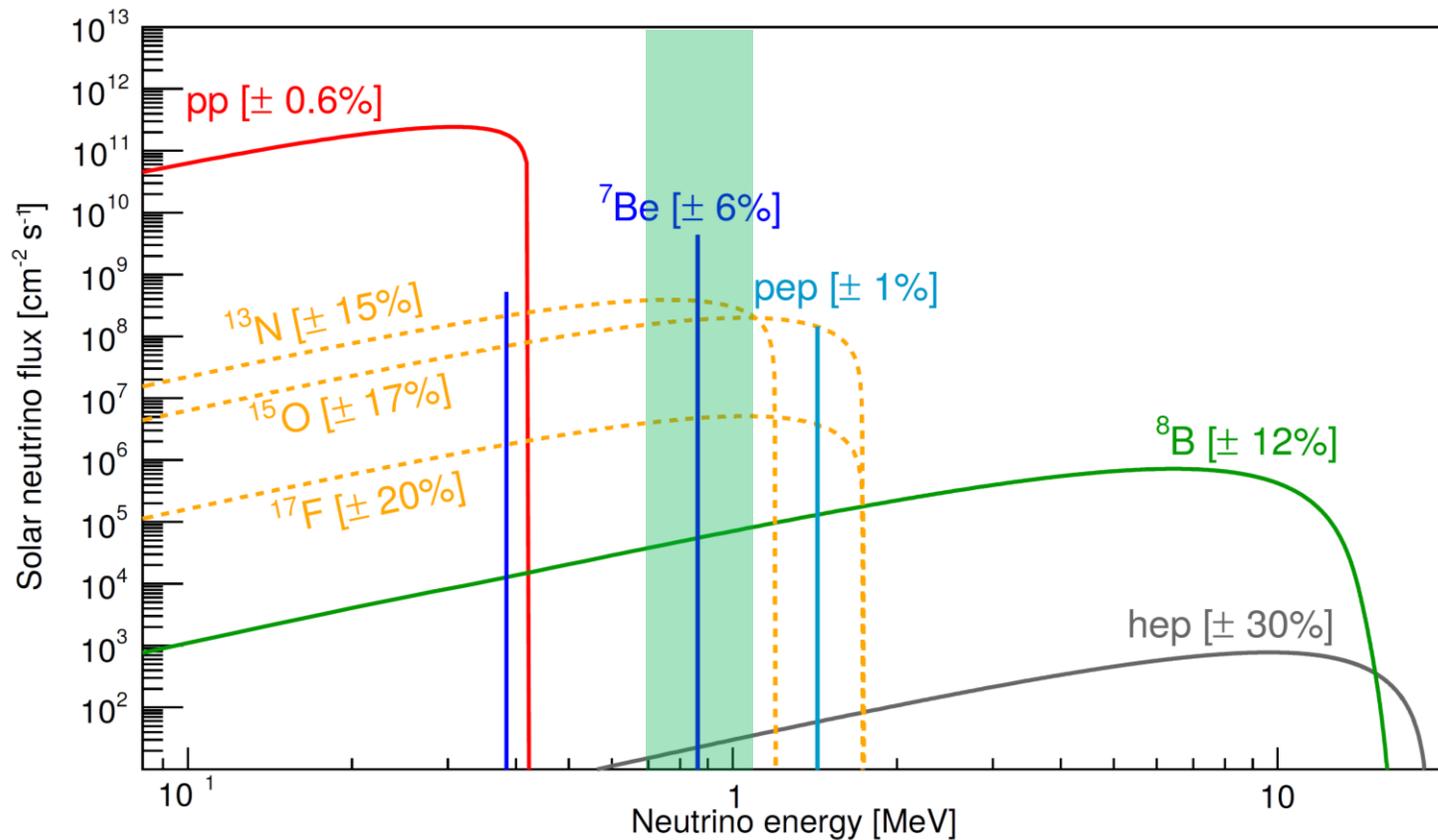


Neutrini solari – Spettro energetico



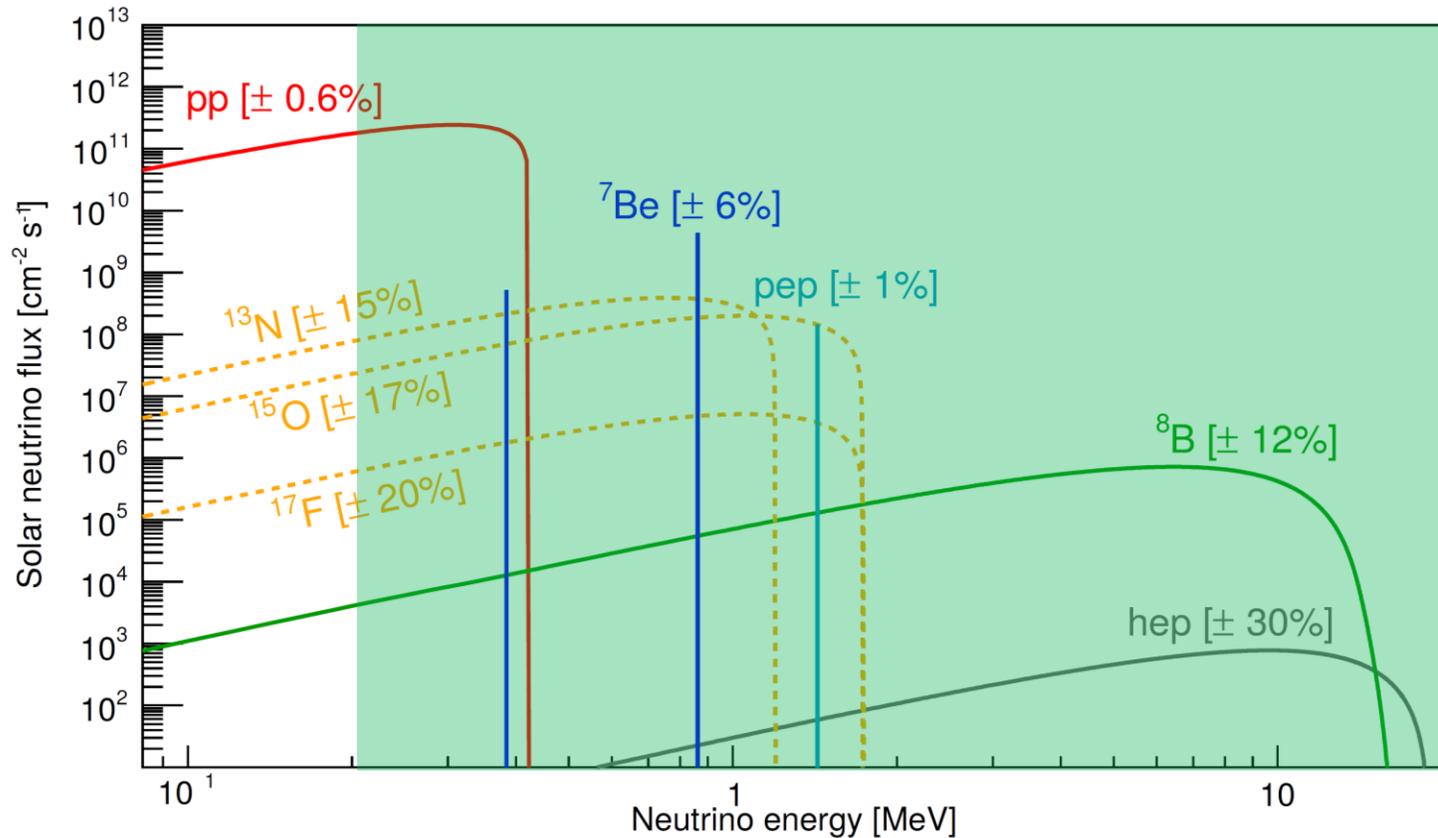
- Spettro di neutrini solari atteso
- Modello Solare Standard B16

Neutrini solari – Spettro energetico



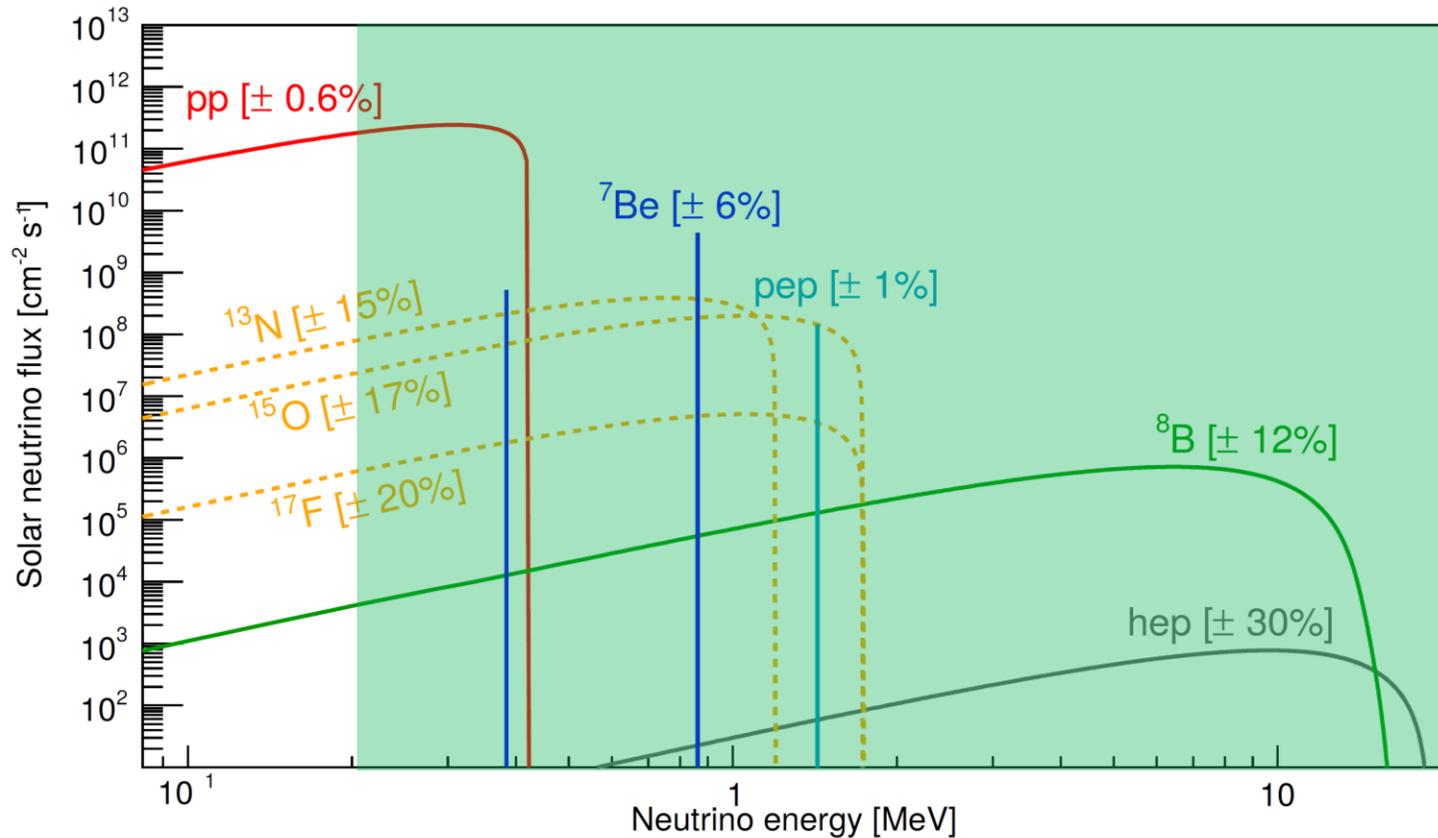
- Spettro di neutrini solari atteso
- Modello Solare Standard B16
- Borexino:
 - obiettivo iniziale: misura di ν da ^7Be

Neutrini solari – Spettro energetico



- Spettro di neutrini solari atteso
- Modello Solare Standard B16
- Borexino:
 - obiettivo iniziale: misura di ν da ^7Be
 - obiettivo raggiunto: tutti i ν dalla catena pp

Neutrini solari – Spettro energetico



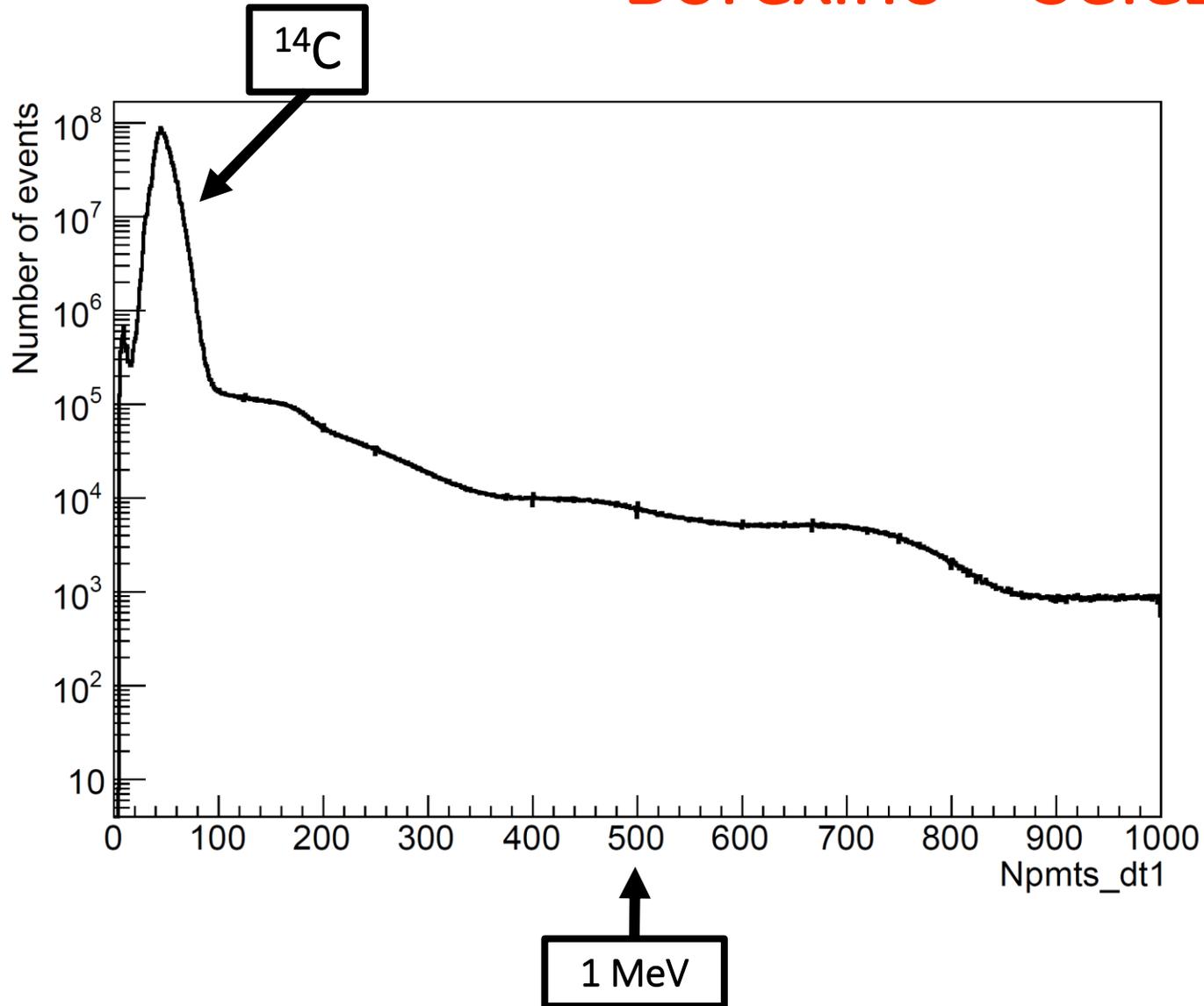
- Spettro di neutrini solari atteso
- Modello Solare Standard B16
- Borexino:
 - **obiettivo iniziale:**
misura di ν da ^7Be
 - **obiettivo raggiunto:**
tutti i ν dalla catena pp

Neutrini solari

Astrofisica: modelli solari, metallicità...

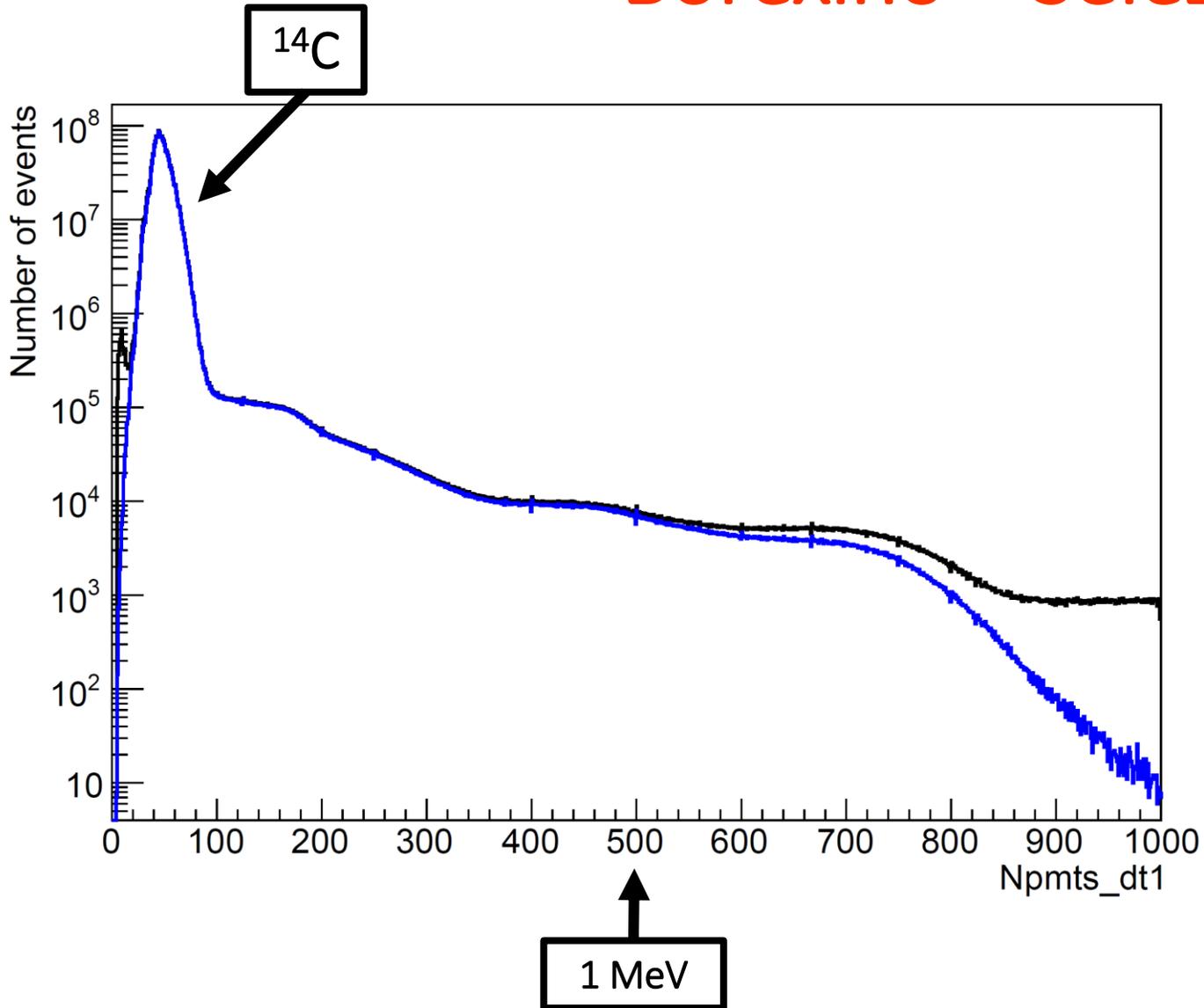
Fisica del neutrino: oscillazioni di sapore

Borexino – Selezione dati



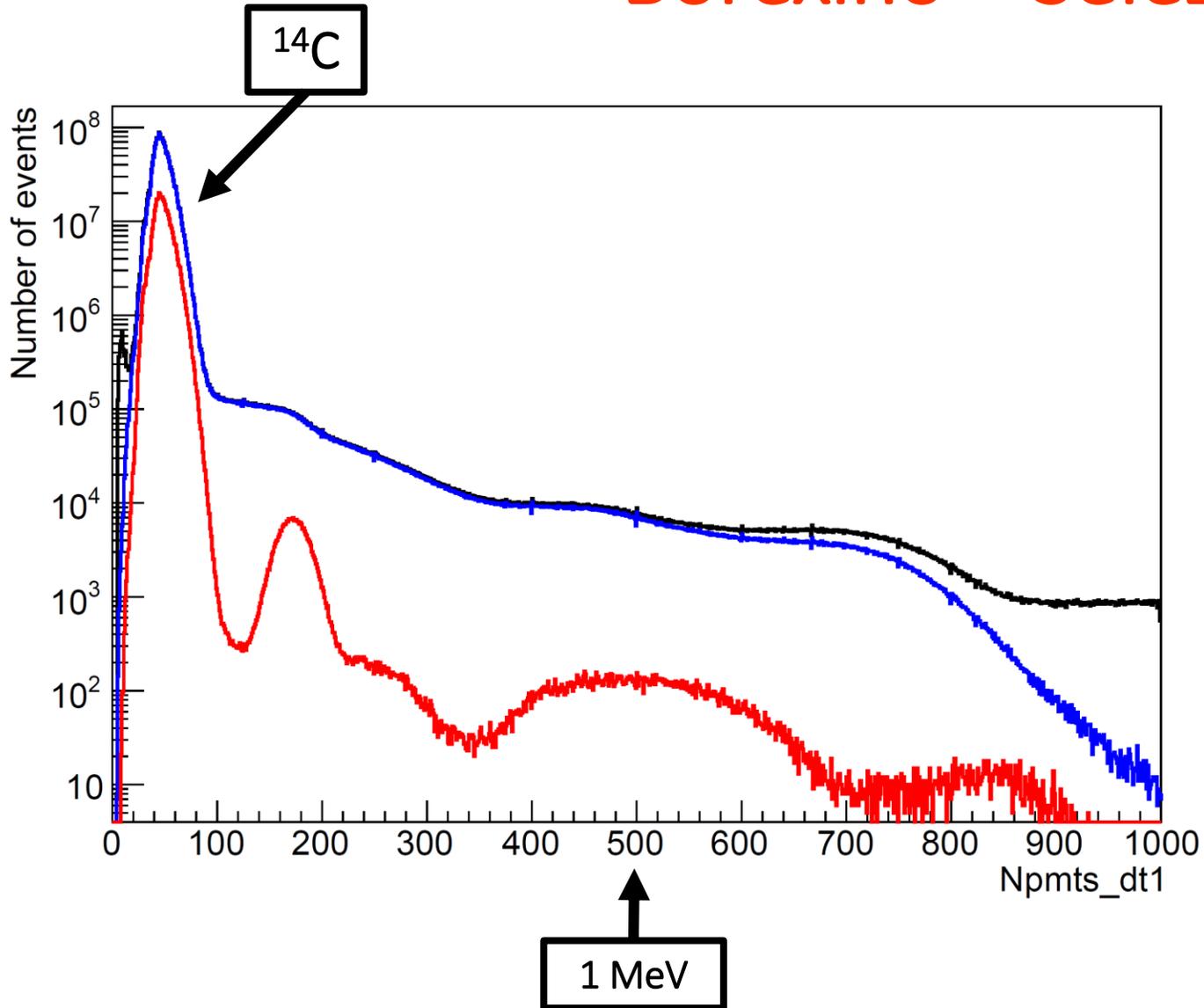
- Spettro grezzo rivelato: nessun taglio

Borexino – Selezione dati



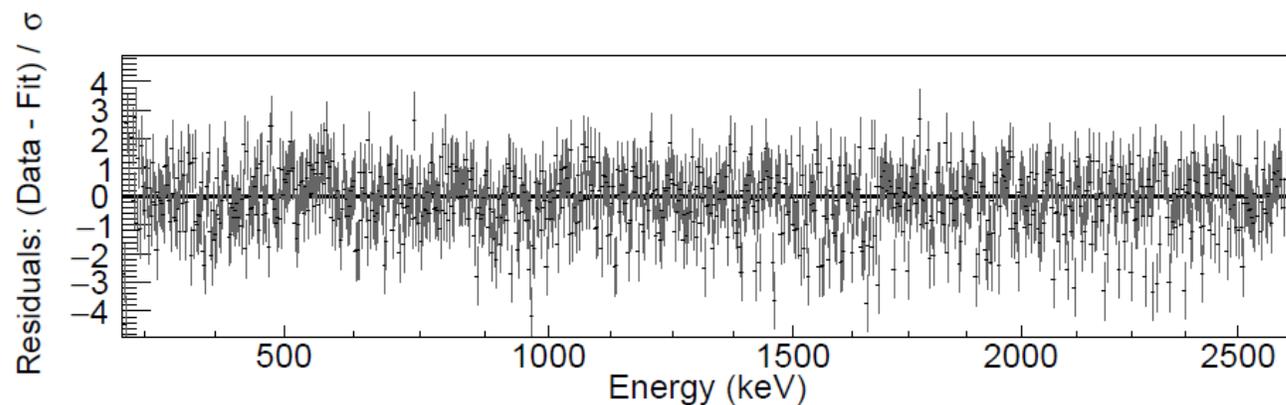
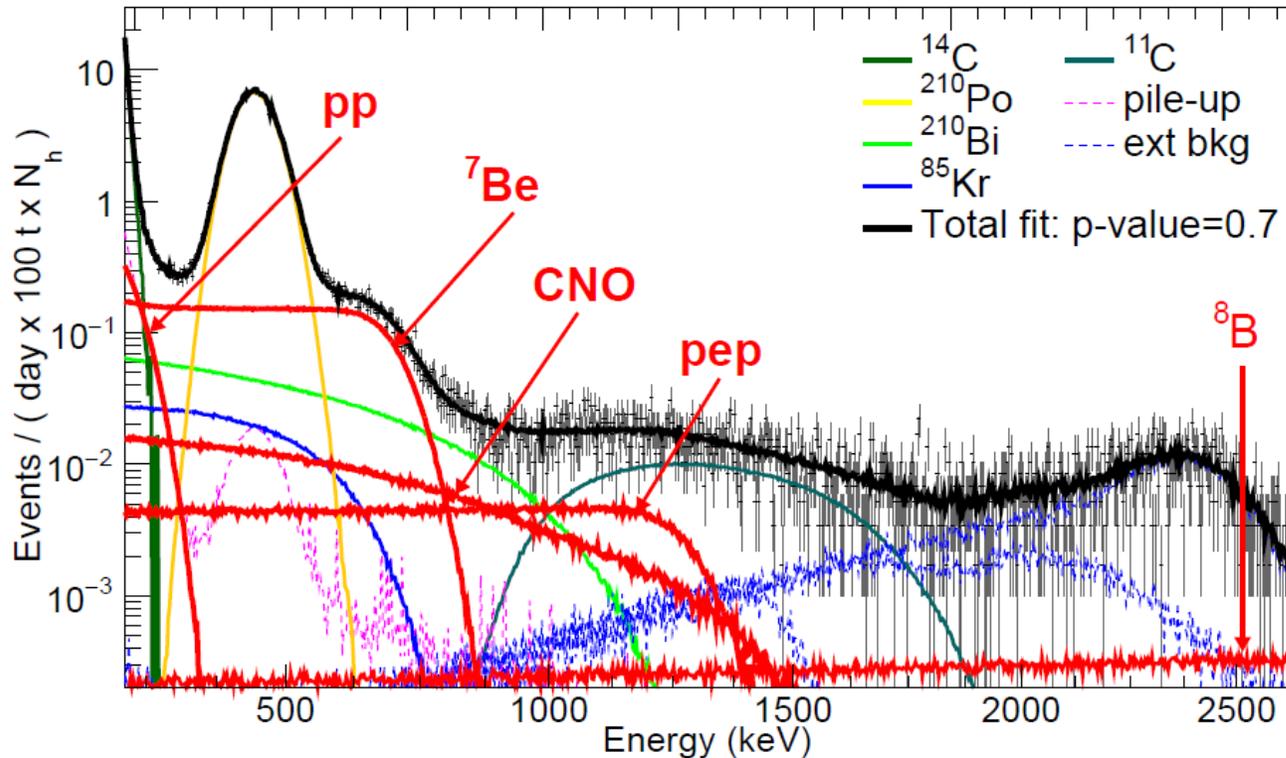
- Spettro grezzo rivelato: nessun taglio
- Spettro dopo taglio muoni

Borexino – Selezione dati



- Spettro grezzo rivelato: nessun taglio
- Spettro dopo taglio muoni
- Spettro dopo selezione di Volume Fiduciale

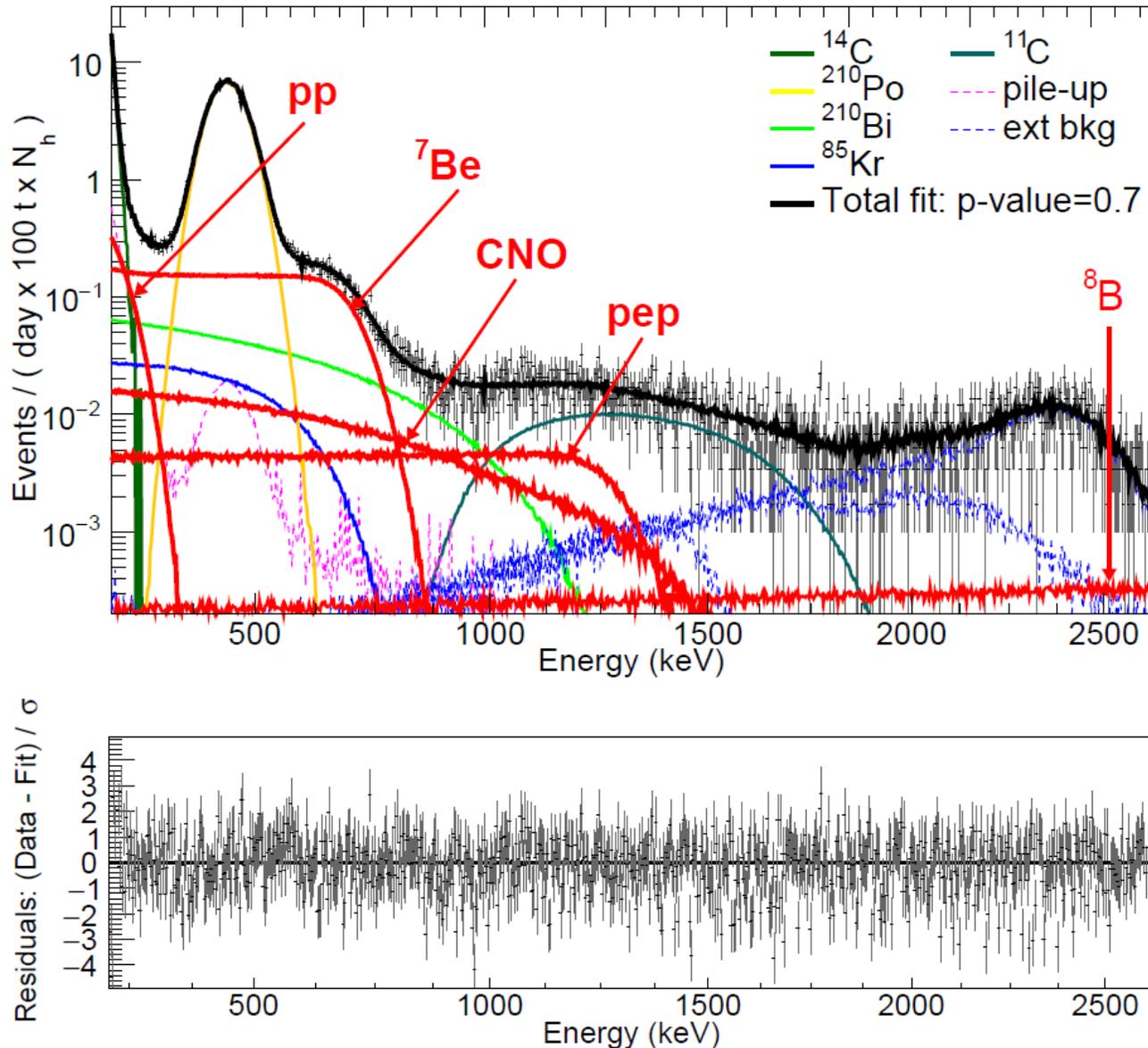
Spettro energetico a bassa energia: fit simultaneo



Fit simultaneo delle componenti a bassa energia
(pp, ^7Be , pep + limite CNO)

- Esposizione 1.6 volte la Fase 1
- Fit da 0.19 MeV a 2.93 MeV.

Spettro energetico a bassa energia: fit simultaneo



Fit simultaneo delle componenti a bassa energia
(pp, ⁷Be, pep + limite CNO)

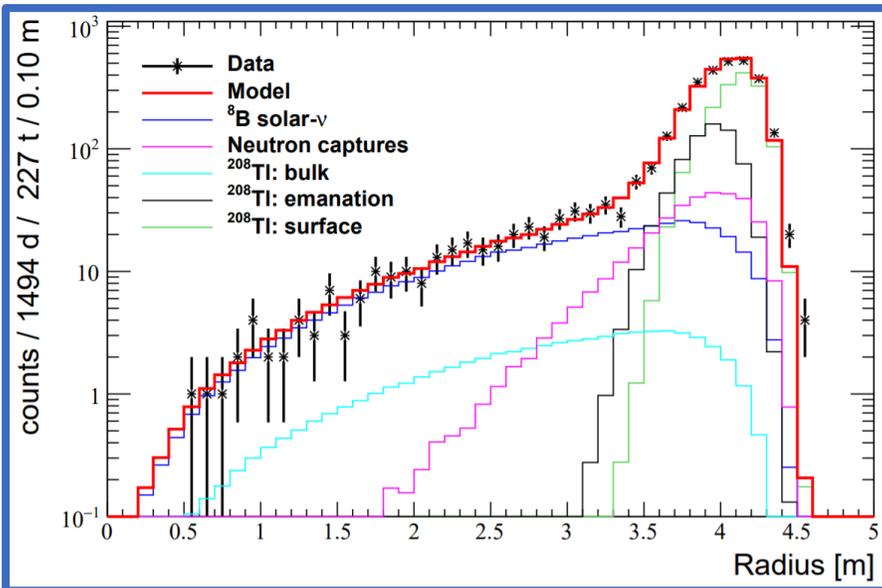
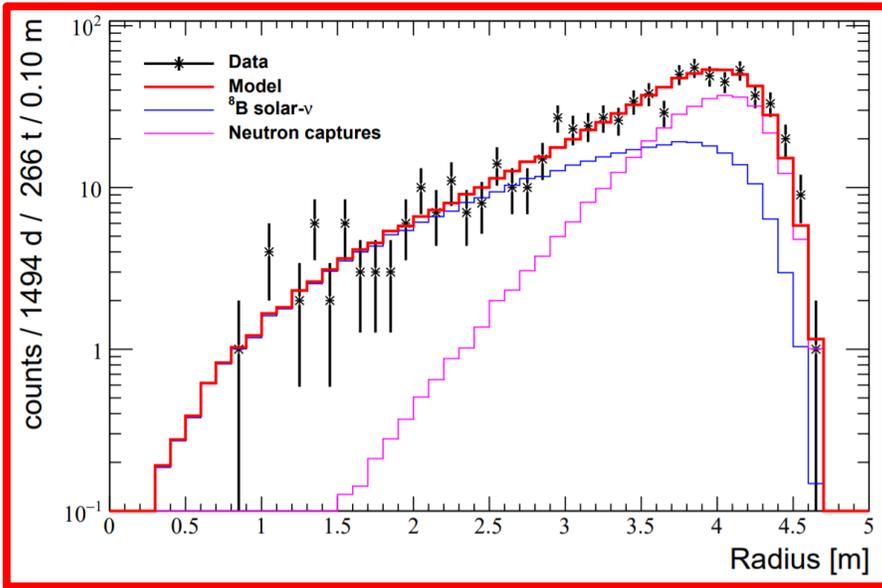
- Esposizione 1.6 volte la Fase 1
- Fit da 0.19 MeV a 2.93 MeV.

Due metodi complementari:

1. **Analitico:** flessibile per variazioni di risposta del rivelatore / propenso a correlazioni
2. **Monte Carlo:** tuning indipendente dei parametri / precisione migliore del %

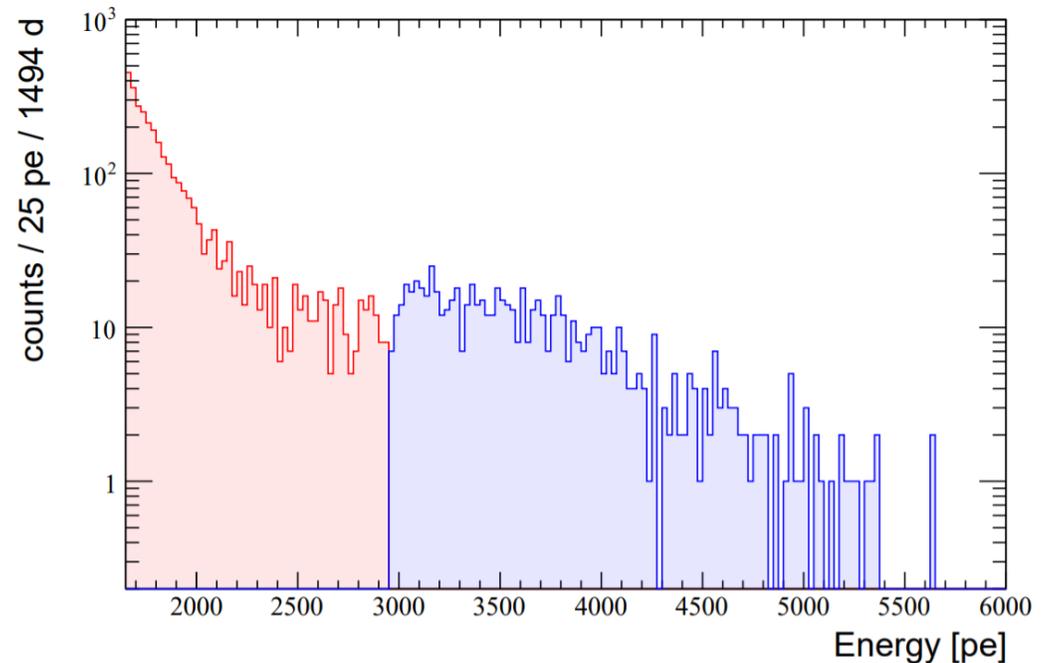
Fit multivariato: minimizzazione di likelihood binnata

Fit per neutrini da ^8B



- Analisi separata
- Esposizione 11.5 volte Fase 1
- Fit **radiale** in due finestre di energia separate per la gestione del fondo: **3.2-5 MeV** e **5-17 MeV**
- Precisione sul flusso: **8%**

Eventi di ^8B dopo selezione



Risultati dei fit

v solari	Rate (cpd/100 t)	Flusso (cm ⁻² s ⁻¹)	Flux –SSM predictions B16 (cm ⁻² s ⁻¹)
pp	$134 \pm 10_{-10}^{+6}$	$(6.1 \pm 0.5_{-0.5}^{+0.3}) \times 10^{10}$	$5.98(1. \pm 0.006) \times 10^{10}$ (HZ) $6.03(1. \pm 0.005) \times 10^{10}$ (LZ)
⁷ Be	$48.3 \pm 1.1_{-0.7}^{+0.4}$	$(4.99 \pm 0.11_{-0.08}^{+0.06}) \times 10^9$	$4.93(1. \pm 0.06) \times 10^9$ (HZ) $4.50(1. \pm 0.06) \times 10^9$ (LZ)
pep (HZ)	$2.43 \pm 0.36_{-0.22}^{+0.15}$	$(1.27 \pm 0.19_{-0.12}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
pep (LZ)	$2.65 \pm 0.36_{-0.24}^{+0.15}$	$(1.39 \pm 0.19_{-0.13}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
⁸ B	$0.223_{-0.016-0.006}^{+0.015+0.006}$	$(5.68_{-0.41-0.03}^{+0.39+0.03}) \times 10^6$	$5.46(1. \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1. \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
CNO	< 8.1 (95 % C.L.)	< 7.9×10^8 (95 % C.L.)	$4.92(1. \pm 0.11) \times 10^8$ (HZ) $3.52(1. \pm 0.10) \times 10^8$ (LZ)
hep	<0.002 (90% C.L.)	< 2.2×10^5 (90 % C.L.)	$7.98(1. \pm 0.30) \times 10^3$ (HZ) $8.25(1. \pm 0.12) \times 10^3$ (LZ)

[cpd/100ton: conteggi al giorno per 100 tonnellate di scintillatore]

- Risultati compatibili rispetto alla Fase 1 e **precisione migliorata**

Risultati dei fit

ν solari	Rate (cpd/100 t)	Flusso ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Flux –SSM predictions B16 ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
pp	$134 \pm 10_{-10}^{+6}$	$(6.1 \pm 0.5_{-0.5}^{+0.3}) \times 10^{10}$	$5.98(1. \pm 0.006) \times 10^{10}$ (HZ) $6.03(1. \pm 0.005) \times 10^{10}$ (LZ)
^7Be	$48.3 \pm 1.1_{-0.7}^{+0.4}$	$(4.99 \pm 0.11_{-0.08}^{+0.06}) \times 10^9$	$4.93(1. \pm 0.06) \times 10^9$ (HZ) $4.50(1. \pm 0.06) \times 10^9$ (LZ)
pep (HZ)	$2.43 \pm 0.36_{-0.22}^{+0.15}$	$(1.27 \pm 0.19_{-0.12}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
pep (LZ)	$2.65 \pm 0.36_{-0.24}^{+0.15}$	$(1.39 \pm 0.19_{-0.13}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
^8B	$0.223_{-0.016-0.006}^{+0.015+0.006}$	$(5.68_{-0.41-0.03}^{+0.39+0.03}) \times 10^6$	$5.46(1. \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1. \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
CNO	< 8.1 (95 % C.L.)	$< 7.9 \times 10^8$ (95 % C.L.)	$4.92(1. \pm 0.11) \times 10^8$ (HZ) $3.52(1. \pm 0.10) \times 10^8$ (LZ)
hep	< 0.002 (90% C.L.)	$< 2.2 \times 10^5$ (90 % C.L.)	$7.98(1. \pm 0.30) \times 10^3$ (HZ) $8.25(1. \pm 0.12) \times 10^3$ (LZ)

[cpd/100ton: conteggi al giorno per 100 tonnellate di scintillatore]

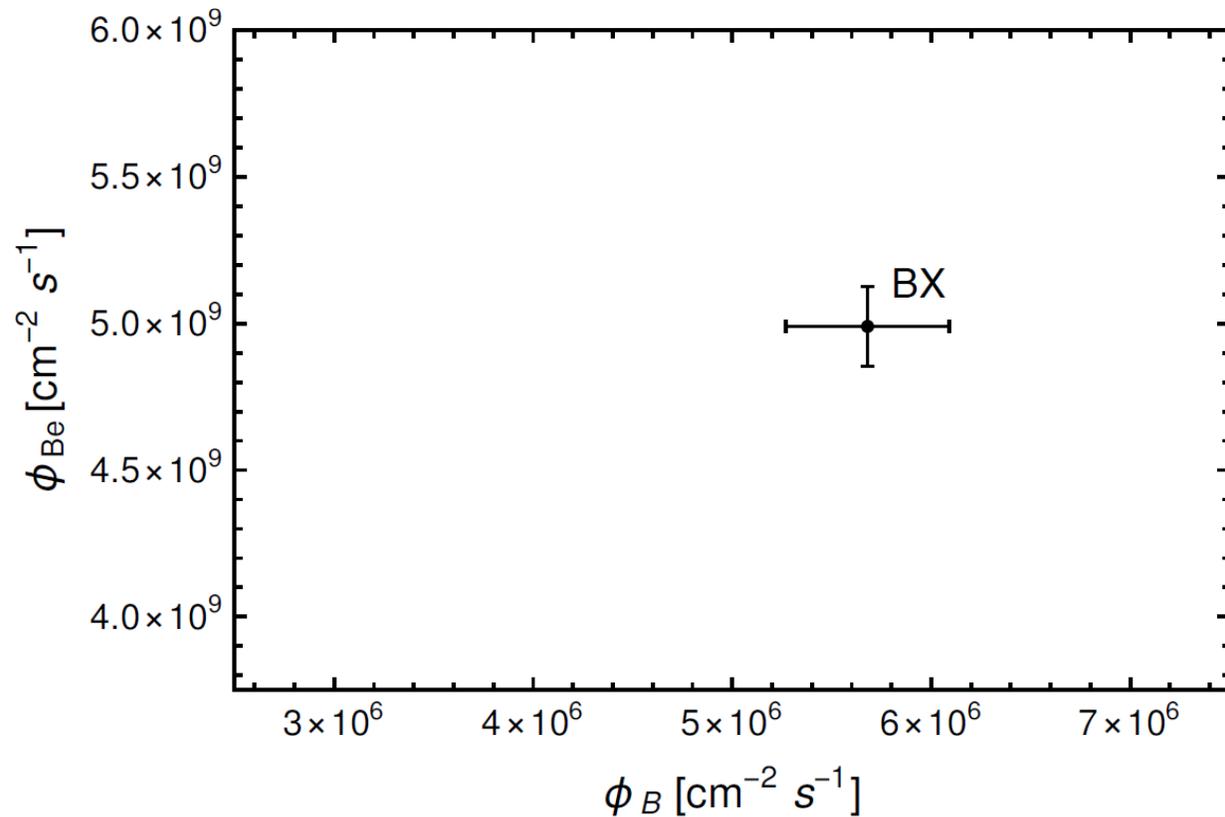
- Risultati compatibili rispetto alla Fase 1 e **precisione migliorata**
- **Assenza di neutrini pep rigettata ad oltre 5σ / Limite su CNO**
- La simultaneità del fit a bassa E limita possibili correlazioni tra le specie di neutrini

Implicazioni: metallicità solare

Metallicità solare: abbondanza di elementi più massivi di He
Fondamentale per la costruzione di modelli solari

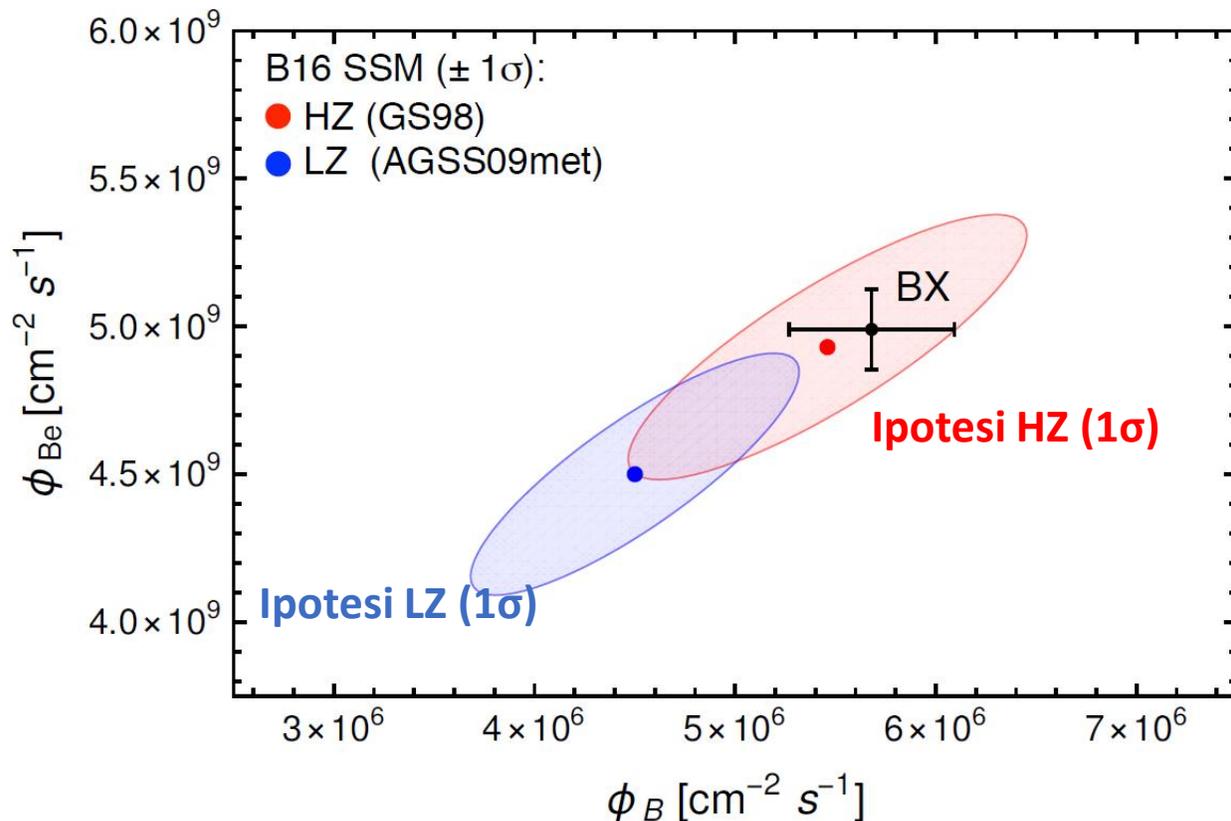
Implicazioni: metallicità solare

Metallicità solare: abbondanza di elementi più massivi di He
Fondamentale per la costruzione di modelli solari



Implicazioni: metallicità solare

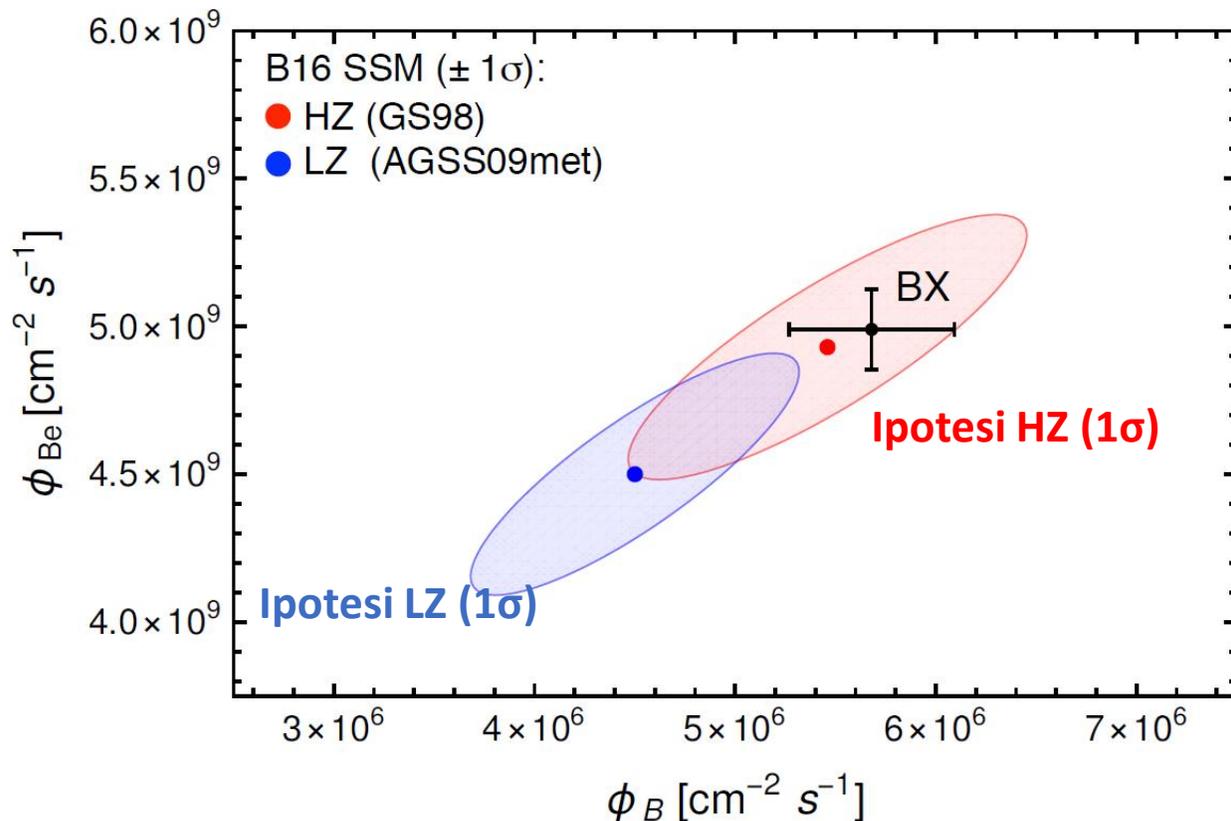
Metallicità solare: abbondanza di elementi più massivi di He
Fondamentale per la costruzione di modelli solari



- v da ${}^7\text{Be}$ e ${}^8\text{B}$: modello con differenze del 9% e 18% a seconda dell'**alta** o **bassa** metallicità
- Incertezza dominante: teorica, su modelli solari

Implicazioni: metallicità solare

Metallicità solare: abbondanza di elementi più massivi di He
Fondamentale per la costruzione di modelli solari



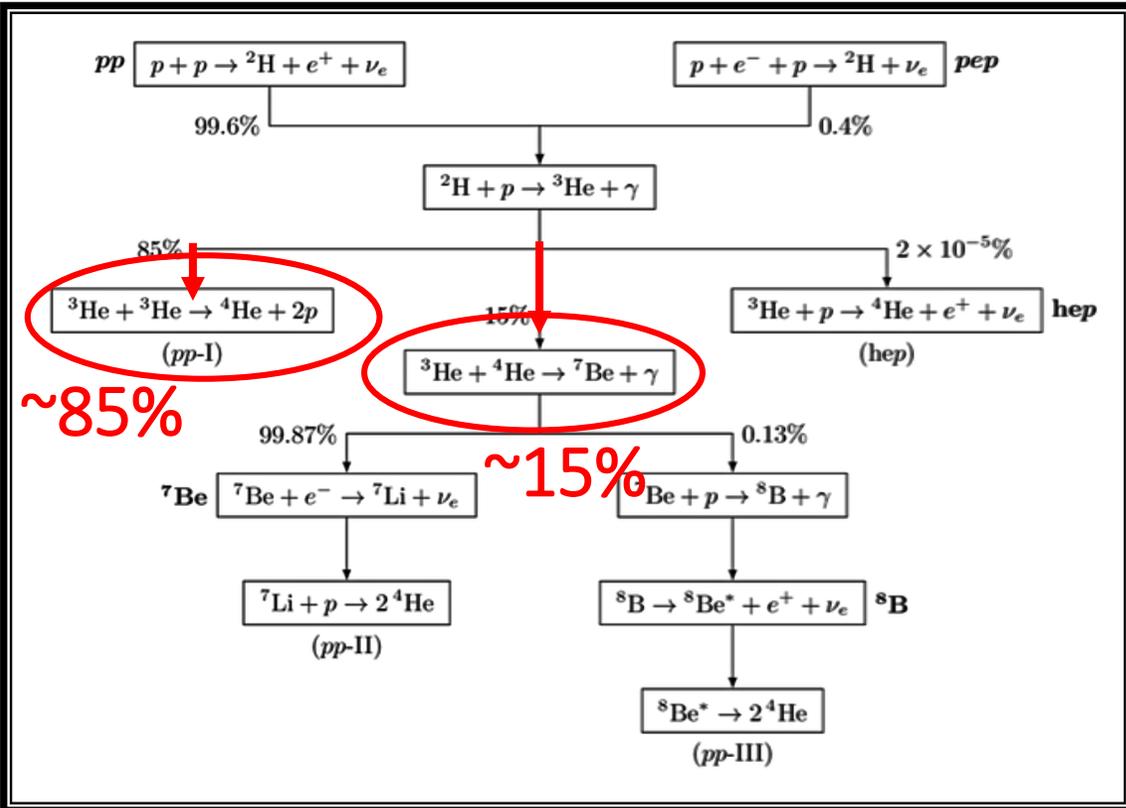
- v da ${}^7\text{Be}$ e ${}^8\text{B}$: modello con differenze del 9% e 18% a seconda dell'**alta** o **bassa** metallicità
- Incertezza dominante: teorica, su modelli solari

Indicazione debole **verso alta met.**
(bassa met. sfavorita a 1.5σ)

Implicazioni: fusione solare

- Ramificazioni della catena pp (da Flussi da pp e da ${}^7\text{Be}$)

$$R = \frac{\langle {}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rangle}{\langle {}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rangle}$$

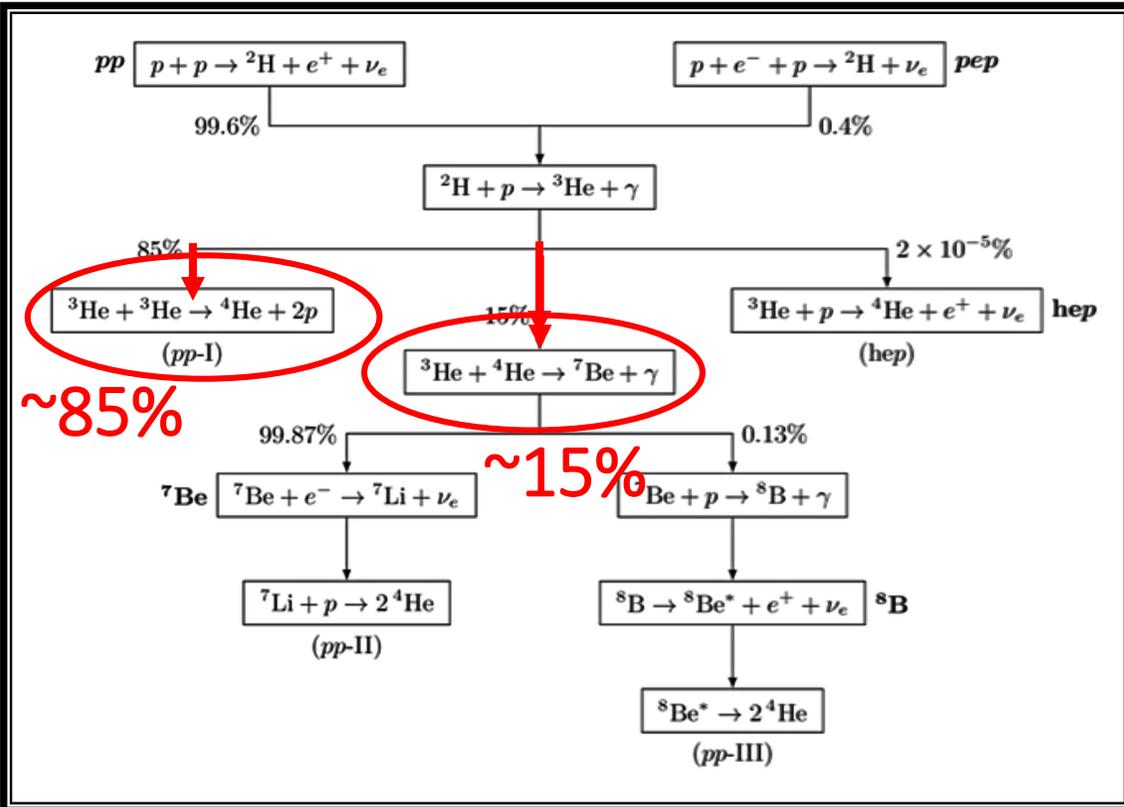


Implicazioni: fusione solare

- Ramificazioni della catena pp (da Flussi da pp e da ${}^7\text{Be}$)

$$R = \frac{\langle {}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rangle}{\langle {}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rangle}$$

- Test sperimentale per la fusione solare



Implicazioni: fusione solare

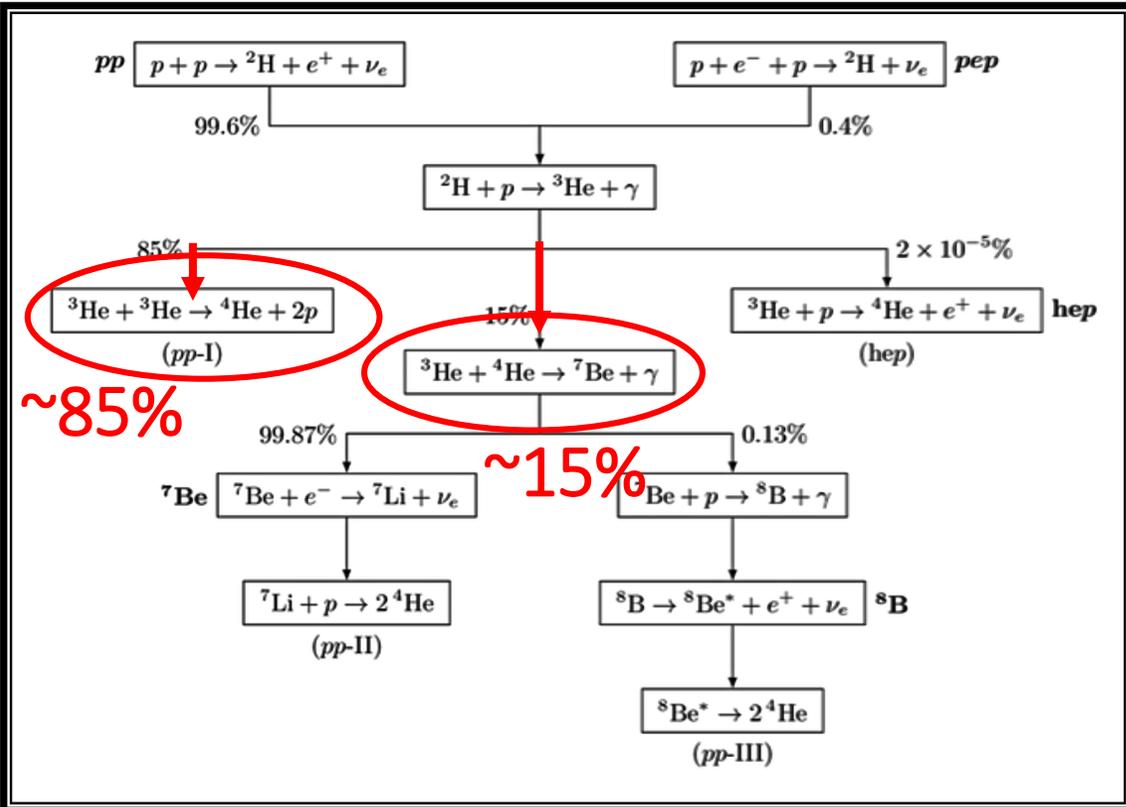
- Ramificazioni della catena pp (da Flussi da pp e da ${}^7\text{Be}$)

$$R = \frac{\langle {}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rangle}{\langle {}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rangle}$$

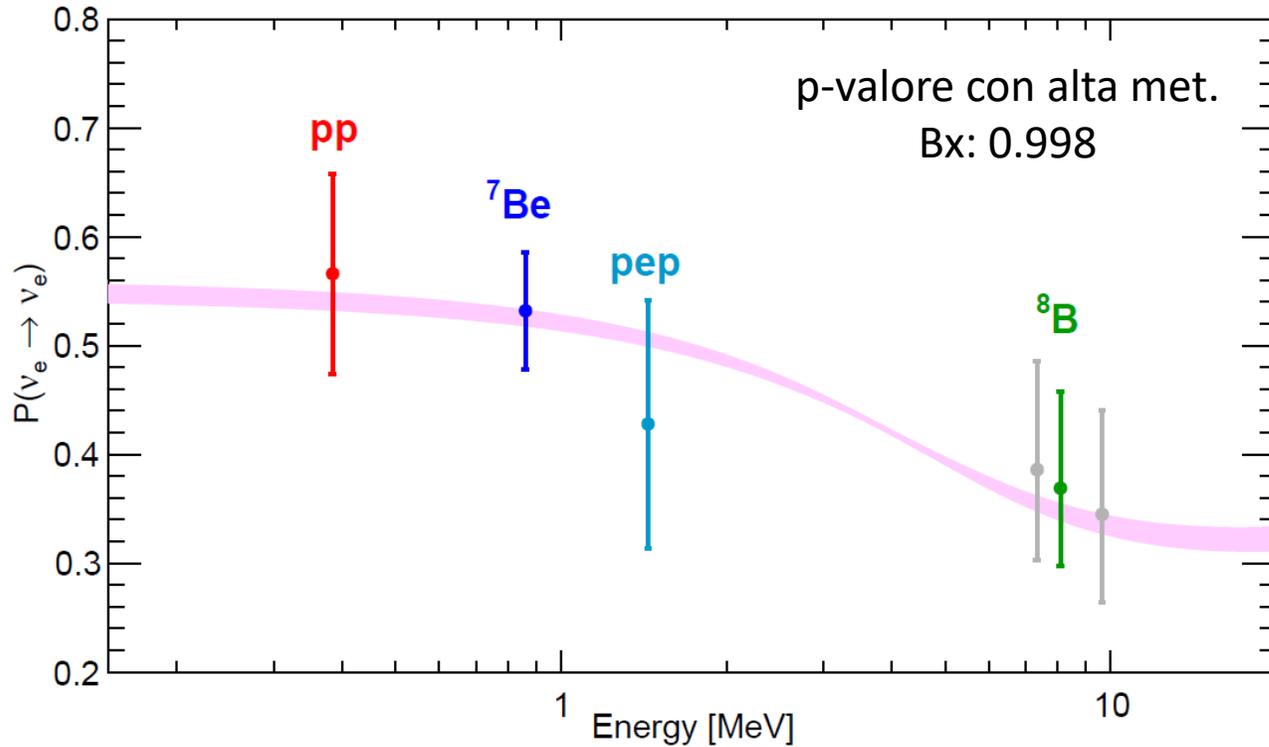
- Test sperimentale per la fusione solare

Predizione teorica:
 $R(\text{HZ}) = 0.18 \pm 0.01$
 $R(\text{LZ}) = 0.16 \pm 0.01$

Borexino:
 $R = 0.18 \pm 0.02$

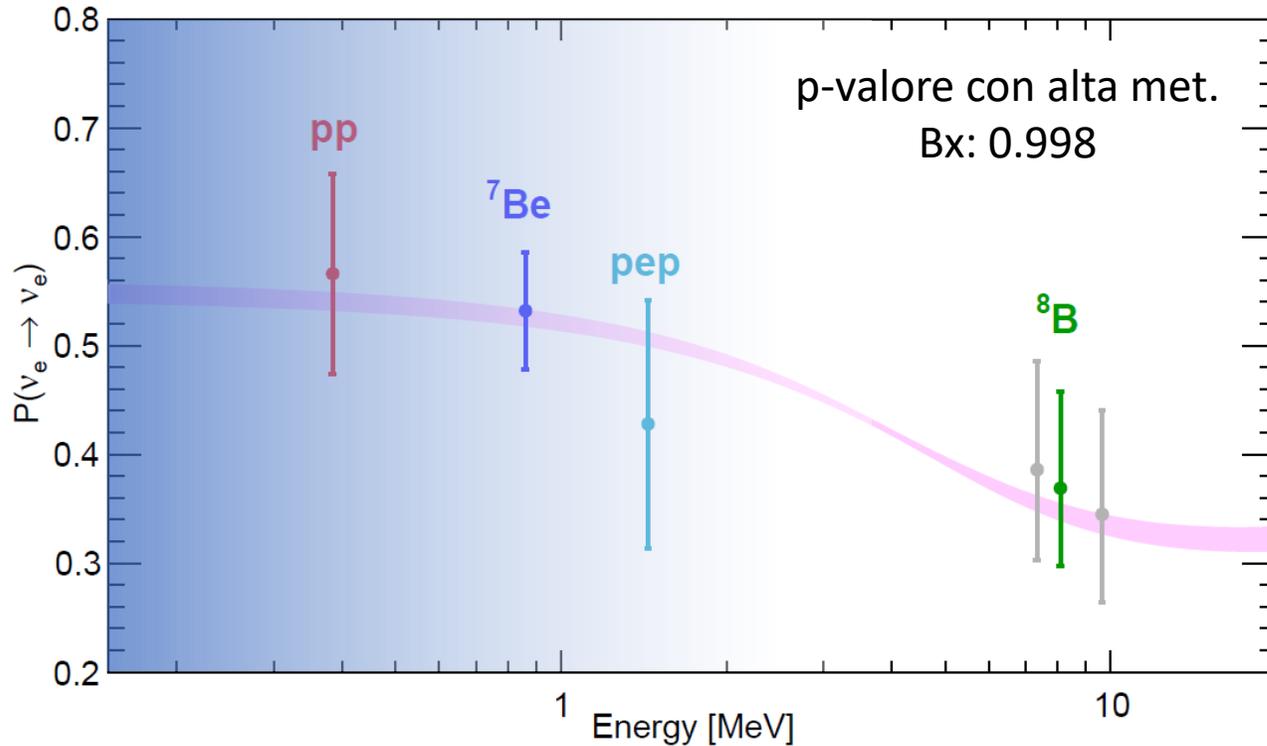


Implicazioni: probabilità di sopravvivenza ν_e



- Rate di interazione \rightarrow probabilità di sopravvivenza ν_e a diverse energie $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$

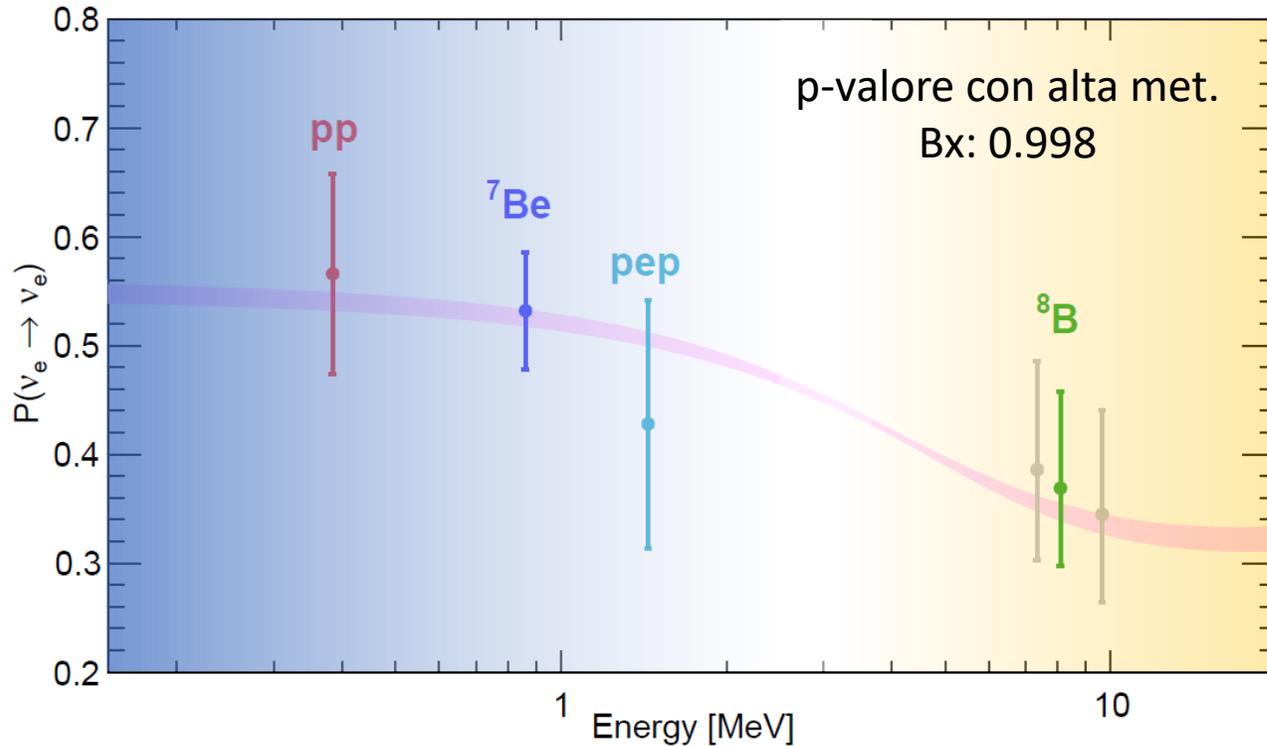
Implicazioni: probabilità di sopravvivenza ν_e



- Rate di interazione \rightarrow probabilità di sopravvivenza ν_e a diverse energie $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$
- Test a **bassa E** che ad **alta E** e confronto con **predizione oscillazione ν_e secondo MSW-LMA**
 - Bassa E: miglior precisione finora
 - Alta E: accordo con SK e SNO

osc. **nel vuoto**
dominante

Implicazioni: probabilità di sopravvivenza ν_e

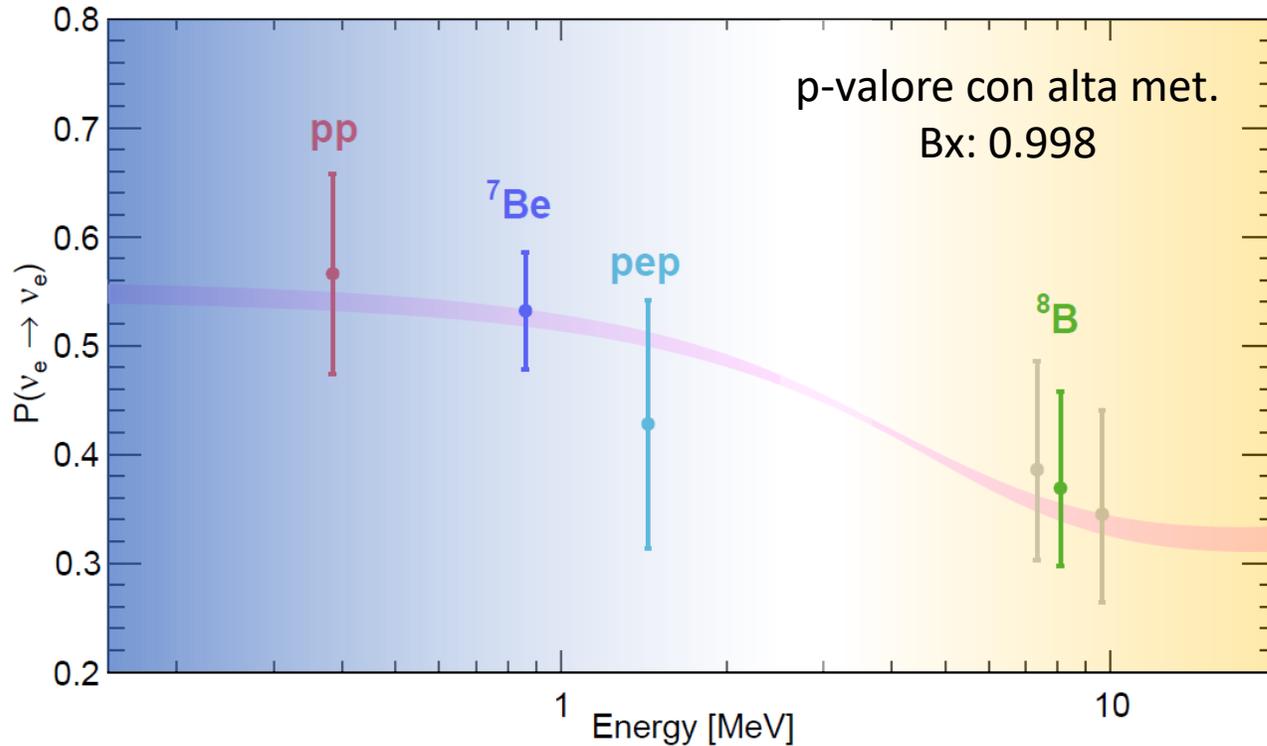


- Rate di interazione \rightarrow probabilità di sopravvivenza ν_e a diverse energie $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$
- Test a **bassa E** che ad **alta E** e confronto con **predizione oscillazione ν_e secondo MSW-LMA**
 - Bassa E: miglior precisione finora
 - Alta E: accordo con SK e SNO

osc. **nel vuoto**
dominante

osc. **nella materia**
dominante

Implicazioni: probabilità di sopravvivenza ν_e



- Rate di interazione \rightarrow probabilità di sopravvivenza ν_e a diverse energie $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$
- Test a **bassa E** che ad **alta E** e confronto con **predizione oscillazione ν_e secondo MSW-LMA**
 - Bassa E: miglior precisione finora
 - Alta E: accordo con SK e SNO

osc. **nel vuoto**
dominante

osc. **nella materia**
dominante

In accordo con oscillazione con
parametri MSW-LMA

Conclusioni

Spettroscopia di neutrini solari

- Misure di precisione: pep (5σ), ${}^7\text{Be}$, pp, CNO (limite), ${}^8\text{B}$, hep
- Test del Modello Solare Standard
- Indicazione debole sulla metallicità solare

Conclusioni

Spettroscopia di neutrini solari

- Misure di precisione: pep (5σ), ${}^7\text{Be}$, pp, CNO (limite), ${}^8\text{B}$, hep
- Test del Modello Solare Standard
- Indicazione debole sulla metallicità solare

Altri risultati di Borexino:

- Geo-neutrini
- Variazioni stagionali
- Limite al momento magnetico del neutrino
- Limite a v da onde gravitazionali
- ...

Conclusioni

Spettroscopia di neutrini solari

- Misure di precisione: pep (5σ), ^7Be , pp, CNO (limite), ^8B , hep
- Test del Modello Solare Standard
- Indicazione debole sulla metallicità solare

Altri risultati di Borexino:

- Geo-neutrini
- Variazioni stagionali
- Limite al momento magnetico del neutrino
- Limite a v da onde gravitazionali
- ...

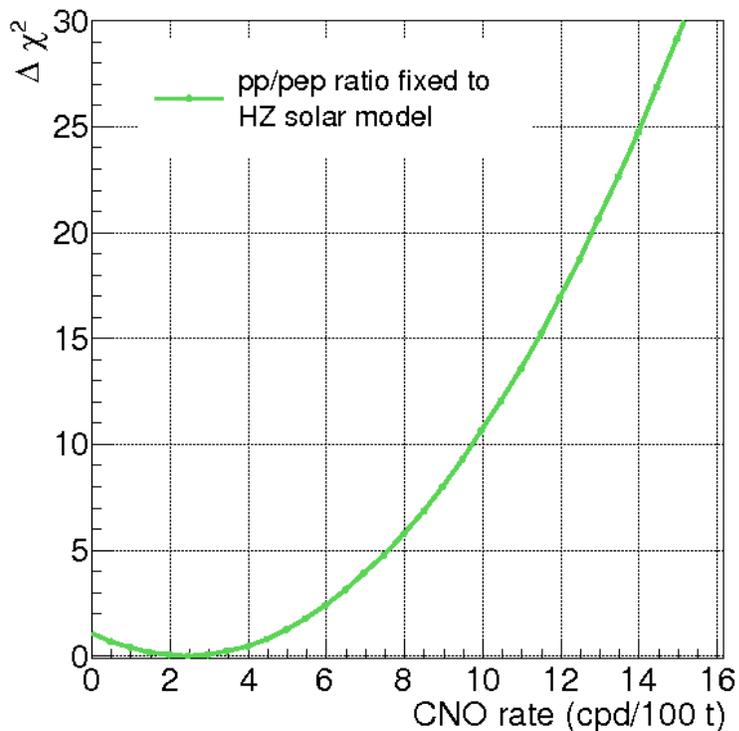
Problemi aperti:

- Metallicità solare: alta o bassa?
- Misura di v da ciclo CNO?

Backup

Risultati: CNO e pep

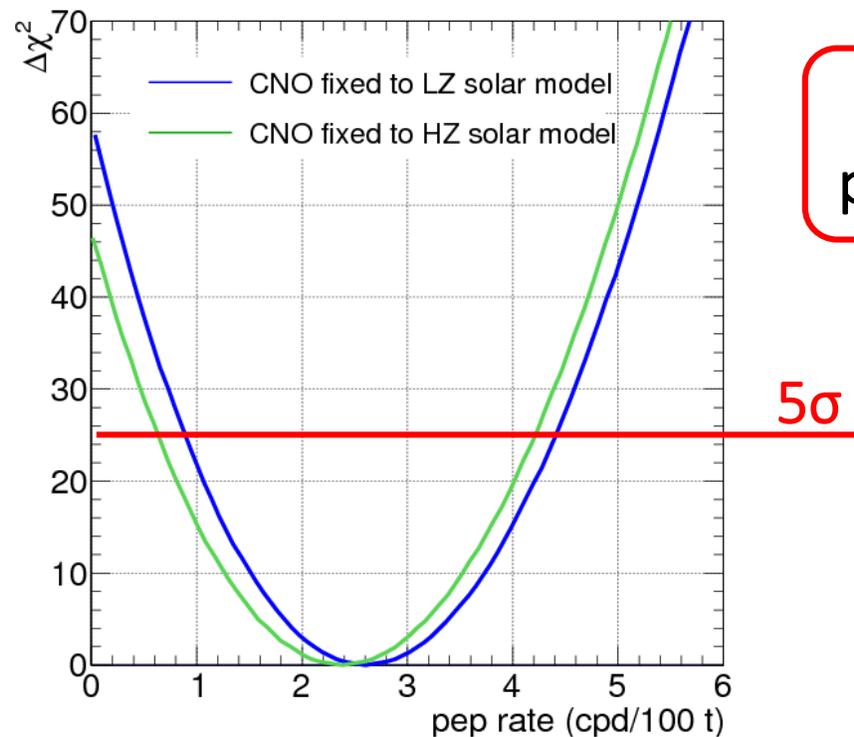
ν CNO
profilo di $\Delta\chi^2$



Limite superiore a ν da ciclo CNO
 $\text{rate(CNO)} < 9.1 \text{ cpd/100 t @ 95\% C.L.}$

Ipotesi HZ: $\text{rate(CNO)} < 4.91 \pm 0.56 \text{ cpd/100t}$
Ipotesi LZ: $\text{rate(CNO)} < 3.62 \pm 0.37 \text{ cpd/100t}$

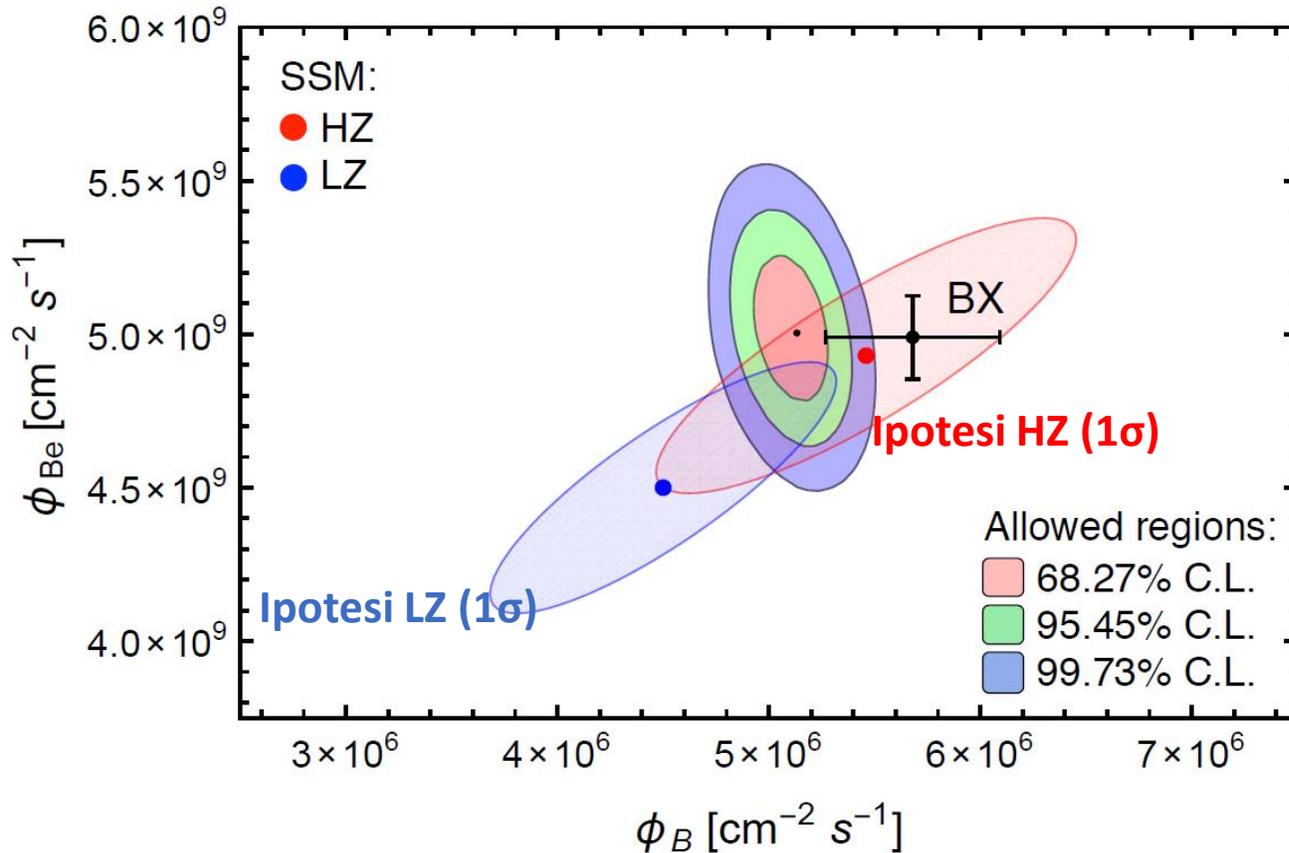
ν pep
profilo di $\Delta\chi^2$



Assenza di neutrini pep rigettata ad oltre 5σ

$\text{rate(pep)} = 2.43 \pm 0.36 \text{ (stat)} + 0.15 - 0.22 \text{ (sys)}$
 cpd/100 t

Metallicità solare – Fit globale



- ν da ${}^7\text{Be}$ e ${}^8\text{B}$: differenze del 9% e 18% a seconda dell'**alta** o **bassa** metallicità
- Fit globale: esperimenti su neutrini solari + KamLand